

気液二相流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/MP

杉中 隆史*

Advance/FrontFlow/MP

Takafumi Suginaka*

Advance/FrontFlow/MP は気液二相流の流動特性や伝熱特性を 3 次元で解析するソフトウェアである。沸騰や凝縮など相変化を伴う気液二相流動や自由表面挙動を安定に計算できることが主な特長である。ここでは、Advance/FrontFlow/MP の機能、理論概要、解析事例を紹介する。

Key word: 気液二相流、二流体モデル、沸騰、凝縮、自由表面、壁面熱伝達、気泡合体、凝集

1. はじめに

Advance/FrontFlow/MP は気液二相流の流動特性や伝熱特性を 3 次元で解析するソフトウェアである。二流体モデル（Euler-Euler 法）の手法により、気体と液体のそれぞれに対して、質量・運動量・エネルギーなどの保存方程式を解いて、気液二相流に関わる物理量の 3 次元分布を求める。

Advance/FrontFlow/MP は 1 つのメッシュの中に多数の気泡や液滴が含まれても、それらの質量・運動量・エネルギーなどを保存して計算することができるため、メッシュサイズや時間刻みを大きくとれ、大規模な解析が可能である。

Advance/FrontFlow/MP の特長は以下の①～⑥である。

- ①相変化や自由表面を安定に計算できる。
- ②壁面熱伝達などの構成方程式が組み込まれている。
- ③気泡流、噴霧流、自由表面、沸騰、凝縮、固体熱伝導を一度の計算で扱える。
- ④気泡群の個別運動と相互作用（高精度詳細気泡流解析モデル）を扱える。
- ⑤気液二相流中で粒子が凝集を伴って運動する挙動を扱える。
- ⑥ソフトウェアを柔軟に修正できる。

2. 機能

Advance/FrontFlow/MP の機能は表 2 に示す通りである。

表 2 機能

項目	機能
二相流の扱い	・二流体モデル（Euler-Euler 法）
多孔質モデル	・速度の 1 次式による抵抗力 ・速度の 2 次式による抵抗力
乱流モデル	・混合型 $k-\varepsilon$ モデル ・分散型 $k-\varepsilon$ モデル（気泡流用） ・渦粘性一定 ・乱流モデルなし
流動様式	・液体単相・気泡流・中間領域・噴霧流・気体単相で判定 ・液体単相・気泡流・気体単相で判定（混相は気泡の状態） ・液体単相・噴霧流・気体単相で判定（混相は液滴の状態）
相間摩擦モデル	・気泡流の抗力係数 ・噴霧流の抗力係数 ・中間領域は、ボイド率 0.3 の気泡流における相間摩擦力とボイド率 0.75 の噴霧流における相間摩擦力が滑らかにつながるように 3 次式で補間
気泡径	・一定値 ・臨界ウェーバー数による式 ・気泡合体モデル
液滴径	・一定値 ・臨界ウェーバー数による式

*アドバンスソフト株式会社 第 2 事業部

2nd Computational Science and Engineering Group,

AdvanceSoft Corporation

抗力係数	・神戸大・富山らの式 ・剛体球の式 ・一定値
揚力係数	・神戸大・富山らの式[8] ・一定値
壁面潤滑力	・Antal らのモデル[5]
乱流拡散力	・Lopez らのモデル[5]
仮想質量力	・仮想質量係数一定値
相間熱伝達モデル	・気泡流（気相側と液相側で異なる熱伝達係数を使用） ・噴霧流（気相側と液相側で異なる熱伝達係数を使用） ・中間領域は、ボイド率 0.3 の気泡流における相間熱流束とボイド率 0.75 の噴霧流における相間熱流束が滑らかにつながるように 3 次式で補間
最小安全膜沸騰温度	・バルク（温度境界層外縁）の液温と壁温と圧力による相関式 ・一定値
限界熱流束温度	・Chen の核沸騰熱流束相関式と Zuber の限界熱流束相関式が一致するように求める方法 ・一定値
壁面熱伝達係数	・液体単相・サブクール核沸騰・飽和核沸騰・遷移沸騰・膜沸騰・蒸気単相を判定して、各相間式を使う方法 ・各相間式に対する修正機能 ・壁面熱伝達様式ごとに一定値
気泡合体	・ポピュレーションバランス ・Prince&Blanch の気泡合体モデル
蒸発モデル	・凝縮ガスの濃度差と物質伝達係数によるモデル
粒子の凝集	・粒径グループごとの質量保存式 ・粒径グループごとの運動量保存式(1way)
格子形状	・ヘキサ、プリズム、ピラミッド、テトラ、これらの混在
離散化	・有限体積法
アルゴリズム	・SIMPLE 法 ・節点中心法 ・Rhie-Chow 法による圧力振動の抑制 ・Muzaferija の手法による拡散項の精度向上
時間積分	・Euler 陰解法 ・クランク・ニコルソン法

移流項の離散化スキーム	・1 次精度風上差分 ・2 次精度風上差分 ・2 次精度風上差分+リミタ ・2 次精度中心差分 ・1 次精度風上差分と 2 次精度中心差分のブレンド
並列計算	・自動領域分割法による並列計算（並列数に制限はない）
ユーザーサブルーチン	・初期値 ・流入境界条件 ・出力 ・質量のソース項 ・運動量のソース項 ・熱量のソース項 ・相間摩擦力 ・壁面熱伝達係数 ・気泡合体のソース項

3. 理論概要[1]

3.1. 計算の流れ

Advance/FrontFlow/MP は、各時刻、各メッシュにおいて、図 1 の全ての計算をバランス（収束）させる。その解が求まったら、1 時間ステップ進めて同様の計算を行うことにより時間発展させる。

3.2. 基礎方程式

Advance/FrontFlow/MP は二流体モデル（Euler-Euler 法）の手法により、気体と液体のそれぞれに対して、質量・運動量・エネルギーなどの保存方程式を解いて、気液二相流に関わる物理量の 3 次元分布を求める。

乱流モデル[2][3]は、①両相で平均化した速度と密度と粘性係数を使う混合型 $k-\epsilon$ モデル、②気泡流において気泡による乱流の生成と散逸を考慮する分散型 $k-\epsilon$ モデル、③渦粘性一定のモデルから選択することができる。混合型 $k-\epsilon$ モデルは気体と液体が分離する流れや気泡流から噴霧流まで変化する流れに適し、分散型 $k-\epsilon$ モデルは気泡流に適している。

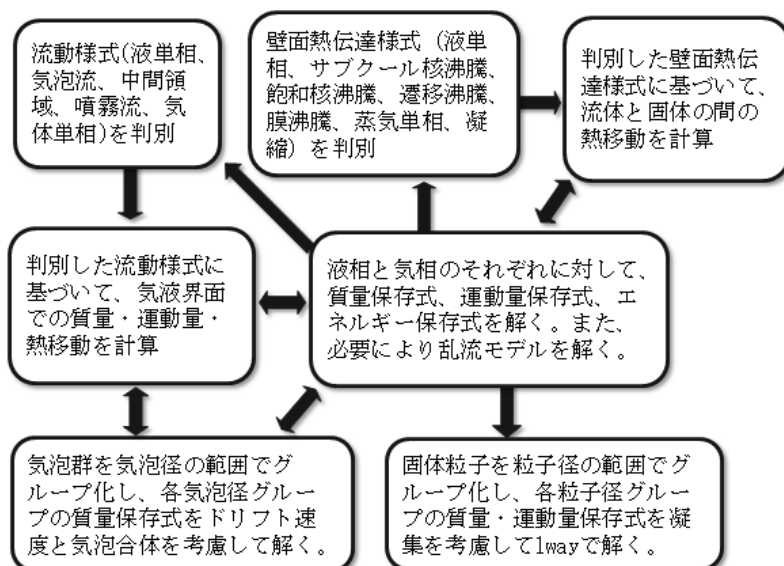


図 1 各時刻、各メッシュにおける計算の流れ

3.3. 流動様式[4] [5]

二流体モデルは、各時刻、各メッシュについて気液二相の状態を調べて、その状態に応じて相間摩擦係数や相間熱流束などの構成方程式（実験相関式）を切り替えて計算する。

Advance/FrontFlow/MP は流動様式線図として、図 2～図 4 を用意している。



図 2 液体単相・気泡流・中間領域・噴霧流・気体単相で判定する流動様式



図 3 液体単相・気泡流・気体単相で判定する流動様式



図 4 液体単相・噴霧流・気体単相で判定する流動様式

3.4. 沸騰と凝縮による質量生成率

沸騰や凝縮による質量生成率 $[\text{kg}/(\text{m}^3\text{s})]$ は、顕熱と潜熱を考慮して、界面におけるエネルギーバランスから求める。

3.5. 相間摩擦力

流動様式が判定され、その流動様式に応じて相間摩擦力が計算される。

気泡流では、抗力係数は富山らが考案した式[6][7]が使用される。

噴霧流では、抗力係数は剛体球の式が使用される。

中間領域では、ボイド率 0.3 の気泡流における相間摩擦力とボイド率 0.75 の噴霧流における相間摩擦力が滑らかにつながるように 3 次式で補間して相間摩擦力が与えられる。

3.6. 相間熱流束[4] [5]

流動様式が判定され、その流動様式に応じて相間熱流束が計算される。

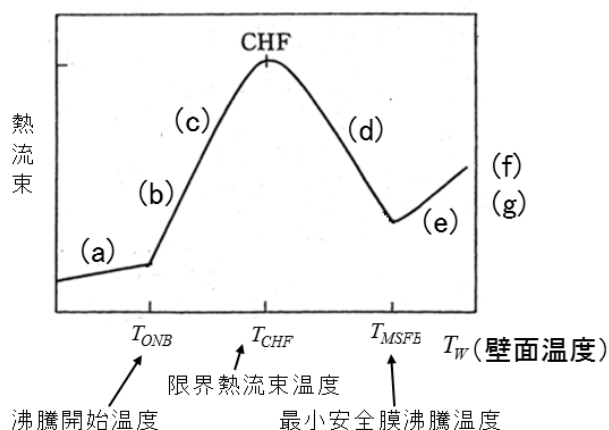
気泡流と噴霧流では、それぞれ気泡と液滴に対して液相側と気相側の相間熱流束が計算される。

中間領域では、ボイド率 0.3 の気泡流における相間熱流束とボイド率 0.75 の噴霧流における相間熱流束が滑らかにつながるように 3 次式で補間して相間熱流束が与えられる。

3.7. 壁面熱流束[4] [5]

各時刻、固体表面上の各メッシュについて沸騰曲線から熱伝達様式を調べて、熱伝達様式ごとに異なる熱伝達相関式が使用される。

Advance/FrontFlow/MP は沸騰曲線として図 5 の(a)~(g)を用意している。すなわち(a)~(g)で異なる熱伝達係数が使用される。



- (a) 液単相
- (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) 蒸気単相
- (g) 凝縮

図 5 沸騰曲線

沸騰曲線における熱伝達様式は、沸騰開始温度と限界熱流束温度と最小安全膜沸騰温度と壁温とバルク（温度境界層外縁）の液温から判定される。

限界熱流束温度は、Chenの核沸騰熱伝達相関式から求めた熱流束とZuberの限界熱流束相関式から求めた熱流束が一致するように繰り返し計算で求められる。

最小安全膜沸騰温度は、圧力と温度で表現した相関式が用意されているが汎用性が高くないので、実験結果がある場合にはそれを与えることが望ましい。

3.8. 気泡合体モデル[9] [10]

Advance/FrontFlow/MP は気泡の合体を考慮して気泡径分布を計算することができる。

気泡径分布の計算は、気泡径の範囲で分けた各気泡径グループに対して、気泡合体のソースタームを考慮した質量保存式（ポピュレーションバランス方程式）を解いて求める。

気泡はマイクロバブル化すると汚れや気泡の帯電が気泡の合体に影響を与えるようになるが、Advance/FrontFlow/MP はマイクロバブルより大きい気泡を対象とした力学モデルを使用する。

気泡合体のソースタームとして、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（合体効率）と衝突頻度の積で表現する Prince&Blanch のモデルが使用される。

3.9. 粒子凝集モデル[11] [12] [13]

気液二相流中に存在する粒子（介在物）挙動は以下の方法で計算される。

- ①粒子は Basset-Boussinesq-Oseen-Tchen 式で記述される運動方程式で計算される。粒子に作用する力として、慣性力と抗力と浮力と圧力勾配力と付加慣性力は考慮されるが、Basset 項は考慮されない。
- ②粒子の凝集・肥大現象は、液体の乱れによる乱流凝集、浮力によって生じる粒子間の速度差に起因する差動凝集、層流せん断による凝集等によるものと考えられる。これらは凝集係数（効率）をパラメーターとして考慮される。
- ③粒子は球形で密度は一定とする。
- ④粒子が液相から受ける抗力は考慮されるが、粒子は気液二相流動に影響を与えないものと仮定する。

4. 解析事例

4.1. 解析実績

Advance/FrontFlow/MP の解析実績として、以下の例がある。

・原子力分野

- 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
 気泡ブルーム解析
 配管内の気泡径分布解析

- ・自動車分野
 - 油焼入れ解析
 - 水焼入れ解析
 - オイルセパレーター解析
 - 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
 - 気泡ブルーム解析
 - タンクのスロッシング解析
- ・化学分野
 - 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
- ・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
 - 配管内の過熱蒸気の凝縮解析
 - 配管内の噴霧流の分配解析
 - 湖内の気液二相流解析
 - 多孔質体を含む構造物回りの自由表面解析

以下の節では、簡単な形状で行った解析事例を示す。

4.2. 沸騰解析

(1) 解析目的

ヒートパイプ内の沸騰を伴う気液二相流動について、パイプ形状と流量と入熱と沸騰状態の関係を把握するための解析を行う。

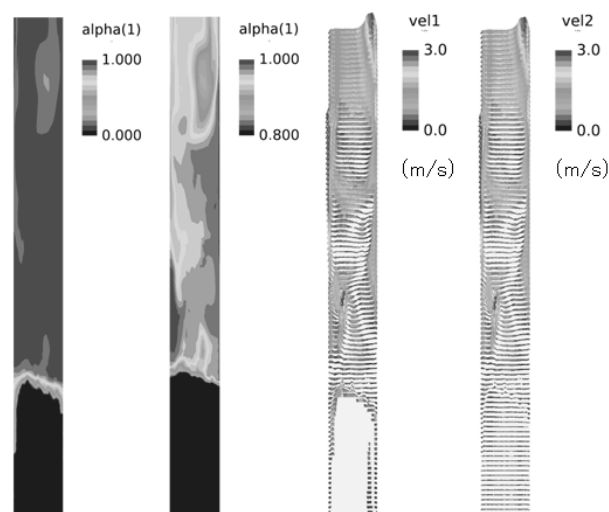
(2) 解析条件

- ・パイプ形状：円管、内径 0.1m、長さ 1m
- ・パイプの向き：垂直
- ・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)
- ・解析モデル：360 度モデル

(3) 解析結果

ボイド率と気相速度と液相速度の 30 秒後の瞬時分布を図 6 に示す。壁面近傍では下端から蒸気層が発生し、下端から 1/3 程度で中心軸上で液体がなくなっていることが分かる。



ボイド率 ボイド率 気相速度 液相速度

図 6 30 秒後の瞬時分布

4.3. 沸騰と固体熱伝導の連成解析

(1) 解析目的

焼入れ過程を解析して、変形や残留応力解析の境界条件となる熱伝達率を求める。

(2) 解析条件

- ・ワーク形状：長さ 32mm、直径 8mm の円柱
- ・ワークの初期温度：900℃
- ・水槽内の初期液温：30℃
- ・解析モデル：2 次元軸対称モデル

図 7 の左側の境界は中心軸である。

(3) 解析結果

冷却曲線と熱伝達様式の出力位置を図 7 に示す。冷却曲線、熱伝達様式の時間変化、気相速度、液相速度をそれぞれ図 8、図 9、図 10、図 11 に示す。

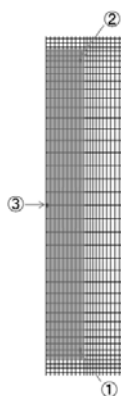


図 7 出力位置

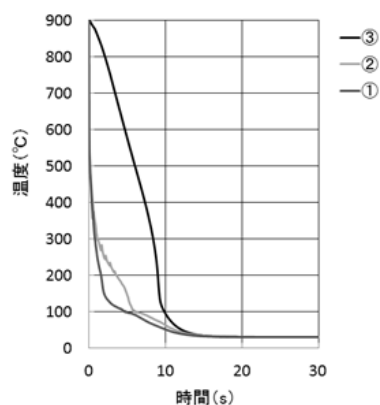


図 8 冷却曲線

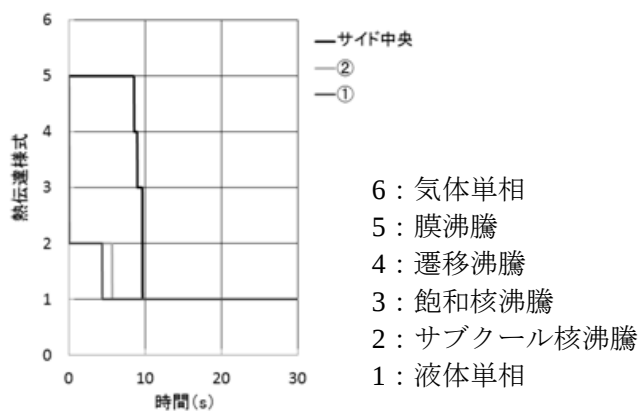


図 9 熱伝達様式の時間変化

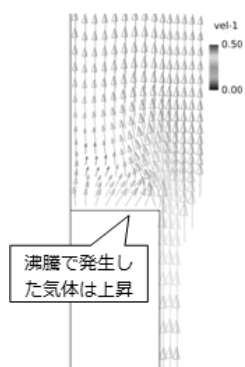


図 10 気相速度

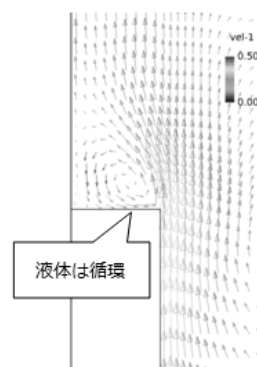


図 11 液相速度

4.4. 自由表面解析

(1) 解析目的

円筒タンクのスロッシング解析における波高と壁面圧力を解析する。

(2) 解析条件

- ・タンク形状：円筒、内径 4m×高さ 4m
- ・初期液面高さ：3m
- ・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

(3) 解析結果

17 秒後の液面形状、最大波高と最小波高の時変化、天板における最大圧力の時間変化をそれぞれ図 12、図 13、図 14 に示す。

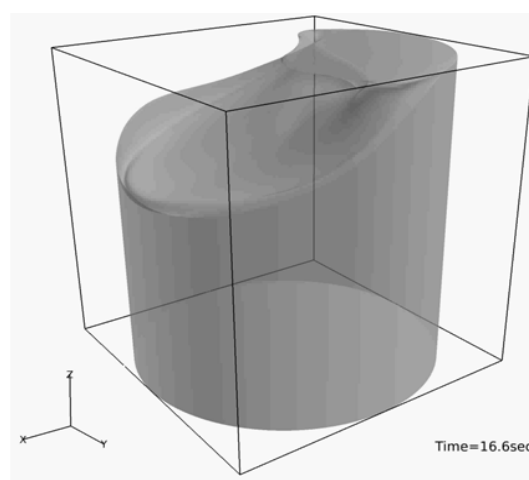


図 12 17 秒後の液面形状

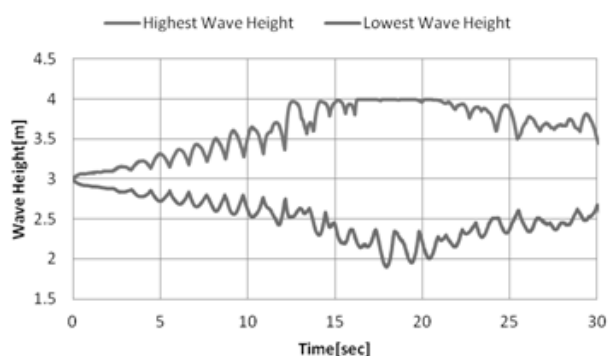


図 13 最大波高と最小波高の時間変化

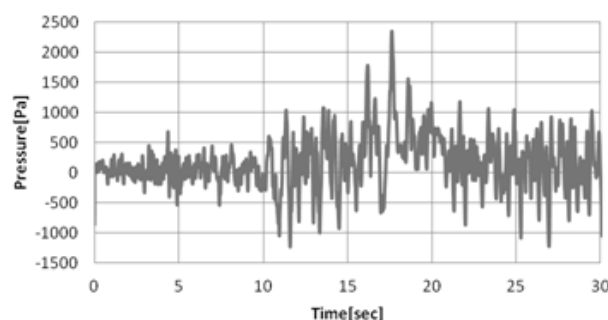


図 14 天板における最大圧力の時間変化

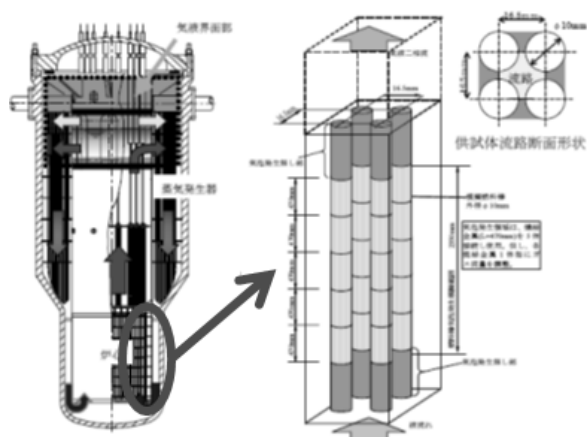
4.5. 気泡合体解析

(1) 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を行い、実験値と比較して気泡径分布の予測精度を検証する。

(2) 解析条件

- ・最下段のみから気泡を注入した試験



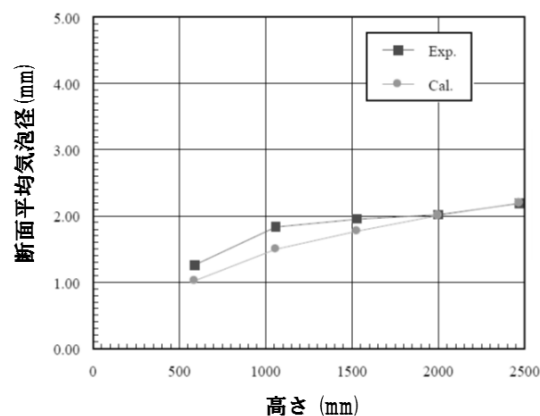
出典：
革新的実用原子力技術開発費補助事業
平成18年度成果報告書概要版
「高温高圧二相自然循環炉の熱流動シミュレーション評価手法の開発」

図 15 解析対象

(3) 解析結果

断面平均気泡径の高さ方向分布を図 16 に示す。

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している。



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ミュレーション評価手法の開発」

図 16 断面平均気泡径の高さ方向分布
：実験値と計算値の比較

4.6. 蒸発解析

(1) 解析目的

液滴、蒸気、空気を考慮して、配管内の液滴蒸発挙動を解析する。

(2) 解析条件

- ・解析対象：図 17
- ・入口（中心部を除く）：空気だけが 1m/s で流入する。
- ・入口（中心部）：液滴だけが 1m/s で流入する。
- ・初期条件：空気だけ
- ・蒸発速度の計算方法：液滴表面とバルクとの蒸気濃度差と物質伝達係数から計算する。
- ・第 1 相：液滴
- ・第 2 相：空気と蒸気の混合気体

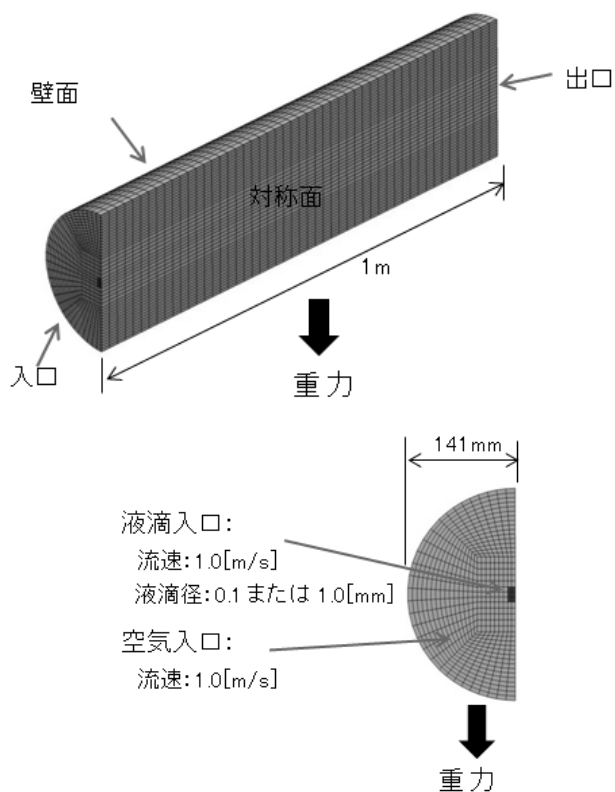


図 17 解析対象

(3) 解析結果

液滴の体積割合、蒸気の質量分率、液滴速度、混合気体の速度をそれぞれ図 18、図 19、図 20、図 21 に示す。図 19 の蒸気の質量分率は、蒸発によって発生したものである。



図 18 液滴の体積割合



図 19 蒸気の質量分率

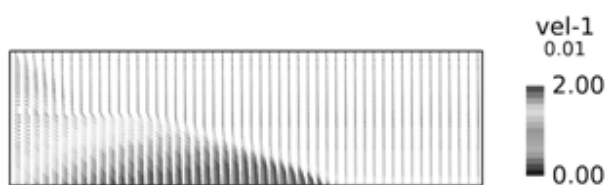


図 20 液滴速度

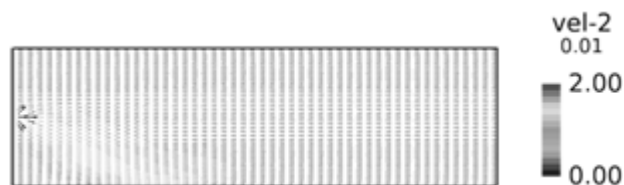


図 21 混合気体の速度

4.7. 粒子凝集解析

(1) 解析目的

粒子の凝集を考慮して粒径分布を解析する。

(2) 解析条件

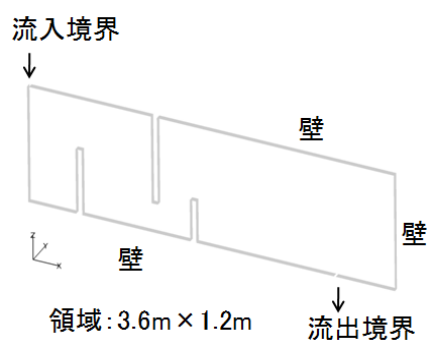
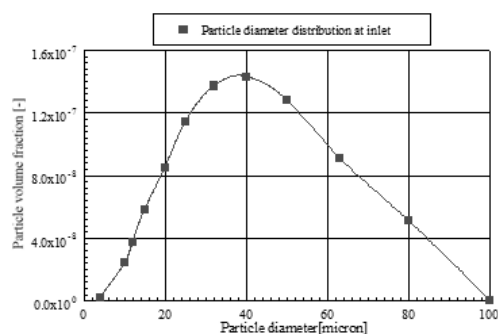


図 22 解析対象

- 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：4、10、12、15、20、25、32、40、50、63、80、100 μm



プロットは考慮する粒径グループ

図 23 入口の粒径分布

(3) 解析結果

液相速度を図 24 に示す。

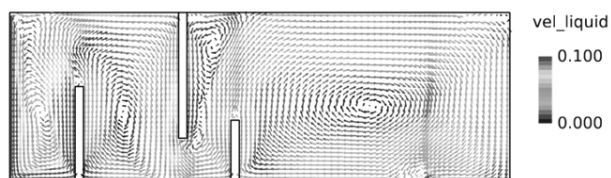


図 24 液相速度

粒径 25~80 μm の体積割合を図 25~図 30 に示す。



図 25 粒径 25 μm の体積割合



図 26 粒径 32 μm の体積割合



図 27 粒径 40 μm の体積割合



図 28 粒径 50 μm の体積割合



図 29 粒径 63 μm の体積割合



図 30 粒径 80 μm の体積割合

粒径 50 μm の生成・消滅速度を図 31 に示す。

正の領域は、4、10、12、15、20、25、32、40 μm の粒径グループ間での凝集によって、50 μm の粒径グループが生成される速度を表わしている。

負の領域は、50 μm の粒径グループが他の粒径グループと凝集して、50 μm の粒径グループが消滅する速度を表わしている。



図 31 粒径 50 μm の生成・消滅速度($\text{m}^3/\text{m}^3\text{s}$)

5. おわりに

Advance/FrontFlow/MP の機能、理論概要、解析事例を紹介した。今後も改良を続け、皆様の業務に活用できるソフトウェアにしたいと考えている。

最後に、Advance/ FrontFlow/MP のロードマップを以下に示す。

- ・ 2015 年夏 バージョンアップ (予定)
 - 前処理の壁面までの距離計算方法の改良
 - 前処理の省メモリ化
 - 京スパコンでの稼働 (超並列化への対応)
 - セル中心法の導入
 - ラージ・エディ・シミュレーションの導入
 - GNU Fortran / C コンパイラへの対応
- ・ 2016 年夏 バージョンアップ (予定)
 - AMG ソルバーの導入
 - リスタート計算時の並列数の変更
 - 数値パラメーターの最適化
 - 沸騰時の離脱気泡径の相関式
 - 沸騰時の気泡離脱速度の相関式
 - 多群詳細気泡流モデルへの沸騰・凝縮モデルの組み込み
- ・ 2017 年夏 バージョンアップ (予定)
 - メッシュ作成の簡単化
 - 圧縮性二相流への拡張
 - 多成分への拡張 (水分中の油や水蒸気中の空気など)

参考文献

- [1] 杉中, 大島, 三橋, “気液二相流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/MP の概要”, アドバンスシミュレーション Vol. 13.
- [2] Lopez de Bertodano, M., Lahey, Jr. R. T., Jones, O. C. : “Development of a $k-\epsilon$ Model for Bubbly Two - Phase Flow”, Trans. ASME, J. Fluid Eng., 116 (1994) p128-134
- [3] Vivek V.Buwa,Vivek V.Ranade : “Dynamic of gas-liquid flow in a rectangular bubble column: experiment and single/multi- group CFD simulations”, Chemical Engineering Science, 57 (2002) p4715-4736
- [4] 秋本, 阿部, 大貫, 村尾, “二流体モデル構成方程式評価用ドライバーコード MINI-TRAC”, 日本原子力研究所 JAERI - M91-086 (1991)
- [5] 秋山, 有富, “新しい気液二相流数値解析”, コロナ社(2002)
- [6] 富山, 片岡, 坂口, “気泡の抗力係数に関する研究”, 機論, 61-587, B(1995), p2357-2364
- [7] 富山, 片岡, 福田, 坂口, “気泡の抗力係数に関する研究”, 機論, 61- 588, B (1995), p2810-2817
- [8] Akio Tomiyama,Hidesada Tamai,Iztok Zun,Shigeo Hosokawa : “Transverse migration of single bubbles in simple shear flows”, Chemical Engineering Science, 57 (2002) p1849-1858
- [9] P. Chen,M.P.Dudukovic,J.Sanyal: “Tree-Dimensional Simulation of Bubble Column Flows with Bubble Coalescence and Breakup”, AIChE Journal, 51 (2005) p696-717
- [10] M.J.Prince and H.W.Blanch,AIChE J. : “Bubble Coalescence and Break-Up in Air-Sparged Bubble Volumns”,36 (1990)p1485-1499
- [11] 高谷幸司他, “連続鋳造プロセスにおける気泡, 介在物挙動の数学的モデリング”, 住友金属, Vol.50, No.2, pp.84-93(1998)
- [12] 谷口尚司, 菊池淳, “流体中微小粒子の衝突・凝集機構”, 鉄と鋼, 第 78 年第 4 号, pp.527-535(1992)
- [13] S. Taniguchi, A. Kikuchi, T. Ise and N. Shoji: “Model Experiment on the Coagulation of Inclusion Particles in Liquid Steel”, ISIJ Int., Vol.36, pp. S 117 –S 120 (1996)

※技術情報誌アドバンスシミュレーションは、アドバンスソフト株式会社 ホームページのシミュレーション図書館から、PDF ファイルがダウンロードできます。(ダウンロードしていただくには、アドバンス/シミュレーションフォーラム会員登録が必要です。)