

気液二相流解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/MP による並列計算

杉中 隆史*

Parallel Computing using 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 の概要、並列計算および解析事例を紹介する。

Key word: スーパーコンピュータ「京」、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

気液二相流解析技術は熱交換器、発電システム、化学装置、輸送機器、環境技術、水資源管理などで広く利用される重要な技術であり、エネルギー利用の高効率化を実現するキーテクノロジーであり、産業界全体に強いニーズがある。

Advance/FrontFlow/MP は相変化を伴う気液二相流計算の安定性を向上させ、さらに、核沸騰、遷移沸騰、膜沸騰などの実際の沸騰現象に対応した沸騰凝縮の壁面熱伝達モデルを開発したことにより、機器の設計や開発に活用できる実用レベルの気液二相流の解析ソフトウェアとして提供するものである。

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 次元分布を求める解析ソフトウェアである。

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、大きなスケールの解析が可能である。

Advance/FrontFlow/MP の特長は以下である。

- ①相変化の計算が安定
- ②自由表面の計算が可能
- ③壁面熱伝達モデルを実装
- ④大規模並列計算が可能

Advance/FrontFlow/MP はスーパーコンピュータ「京」を使用した解析実績がある。

2. Advance/FrontFlow/MP の概要[1]

2.1. 機能一覧

Advance/FrontFlow/MP の機能一覧を表 1 に示す。

表 1 機能一覧

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
流動様式	・液体単相・気泡流・中間領域・噴霧流・気体単相に分類 ・液体単相・気泡流・気体単相に分類 (混相時は気泡) ・液体単相・噴霧流・気体単相に分類 (混相時は液滴)

*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

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（値は変更可能）
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
抗力係数	・神戸大・富山らの式[6][7]が ・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 ・ Muzafferija 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+リミタ ・ 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

2.2. 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。

2.3. 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力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 1～図 3 を用意している。



図 1 液体単相・気泡流・中間領域・噴霧流・気体単相に分類する流動様式

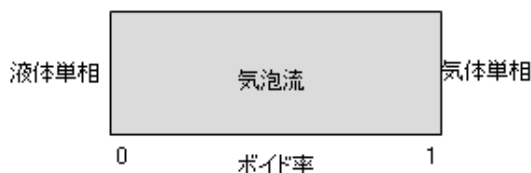


図 2 液体単相・気泡流・気体単相に分類する流動様式

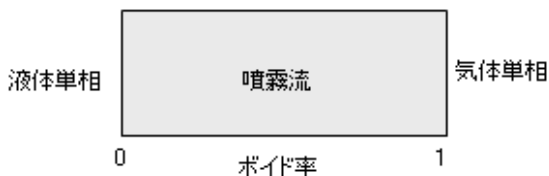


図 3 液体単相・噴霧流・気体単相に分類する流動様式

2.4. 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。

2.5. 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汎用的な式[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。

2.6. 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。

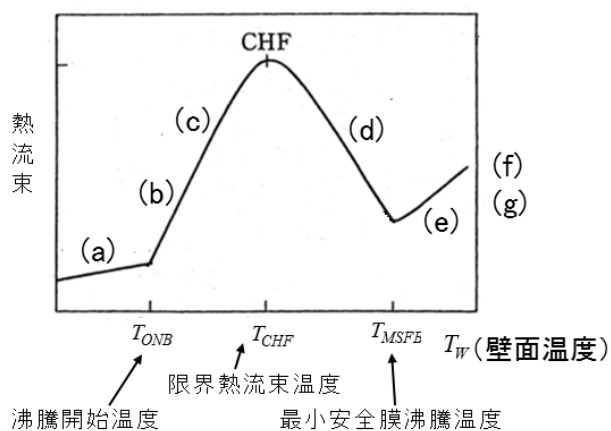
気泡流と噴霧流では、それぞれ気泡と液滴に対して液相側と気相側の相間熱流束が計算される。

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。

2.7. 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が求められ、熱伝達様式ごとの熱伝達相関式が使用される。

Advance/FrontFlow/MP は沸騰曲線として図 4 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 4 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、現在の式は汎用性が高くないので、実験結果がある場合にはそれを使用することが望ましい。

2.8. 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。

2.9. 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。

3. 並列計算

3.1. スーパーコンピューター「京」への移植

Advance/FrontFlow/MP をスーパーコンピューター「京」に移植するために以下の作業を行った。

- ① グローバルにメモリを確保する配列の修正
配列の要素にプロセス数（領域分割数）を入れないようにして使用メモリを減らした。
- ② 配列を動的割付
変数が使用されなくなった時点でdeallocateして使用メモリを減らした。

また、AMG を実装したところ、通常の精度で計算する場合には、高速化に大きな効果は得られなかった。

3.2. 性能評価

コンパイラオプションを一般的な O2 にして128 並列で計算した時の時間を基準計算時間として、並列数と計算時間の関係を図5に示す。スーパーコンピューター「京」では Kfast というコンパイラオプションを使用することができるため、Kfast を使用した結果も加えた。

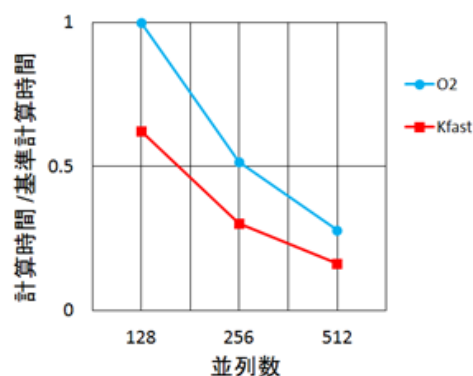


図5 並列数と計算時間の関係

並列数と増速率の関係を図6に示す。

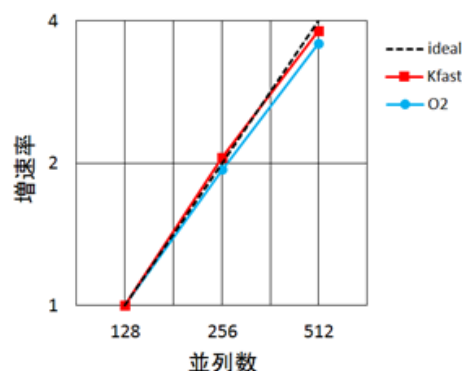


図6 並列数と増速率の関係

4. 解析事例

4.1. 解析実績

Advance/FrontFlow/MP の解析実績例を以下に示す。

① 自動車分野

熱交換器の沸騰凝縮解析

気泡除去装置の解析

熱交換器の沸騰凝縮解析

配管内の圧損解析

表面張力による液体挙動解析

焼入れ熱処理の解析

② 原子力分野

燃料集合体の解析

気水分離器の解析

気流ジェット噴流装置の解析

垂直管と水平管の環状流解析

プール水のスロッシング解析

③ 化学分野

気泡塔内の解析

T 字合流配管部のサーマルストラIPPING現象の解析

④ その他

製鉄プロセスの解析

配管内の液滴の蒸発解析(拡散)

配管内の蒸気の凝縮解析

海中の気泡流解析

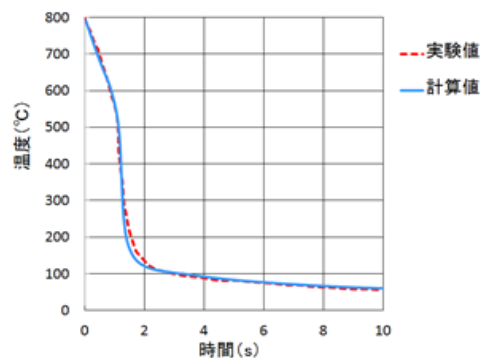


図 7 冷却曲線

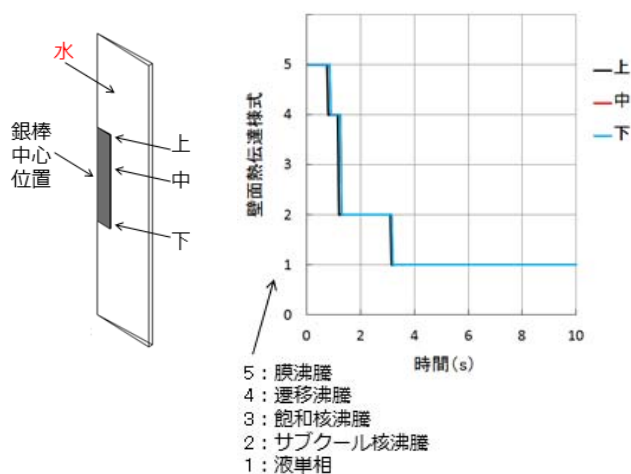


図 8 表面熱伝達様式の時間変化

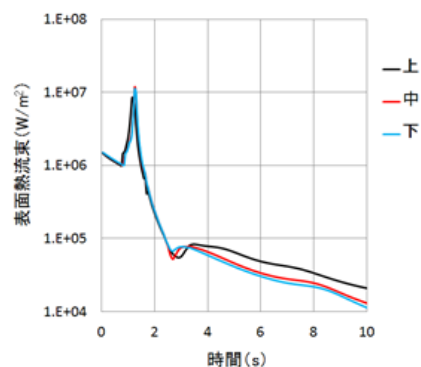


図 9 表面熱流束の時間変化

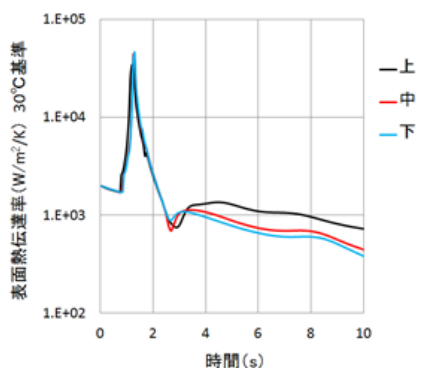


図 10 表面熱伝達率の時間変化

4.2. 沸騰解析 1

(1) 解析目的

冷却曲線の予測可能性をテストする。

(2) 解析条件

- ・ワークの材質：銀（相変態なし）
- ・ワーク形状：長さ 30mm、直径 10mm の円柱
- ・ワークの初期温度：800℃
- ・冷却材：水
- ・水槽内の初期液温：30℃

(3) 解析結果

冷却曲線の計算値と実験値[14]を図 7 に示す。

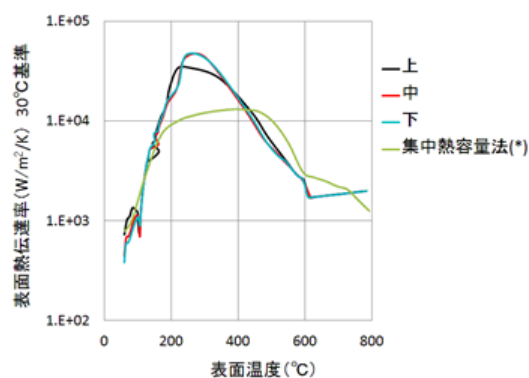


図 11 表面温度と表面熱伝達率の関係[14]

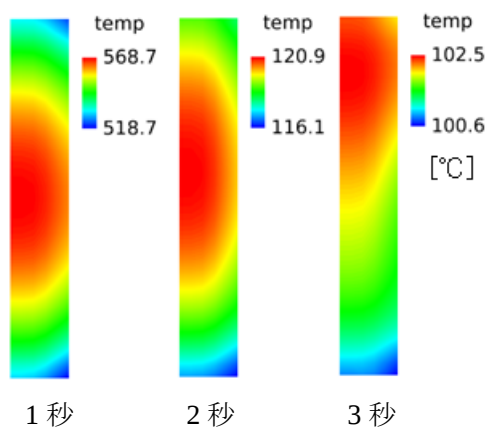


図 12 固体温度

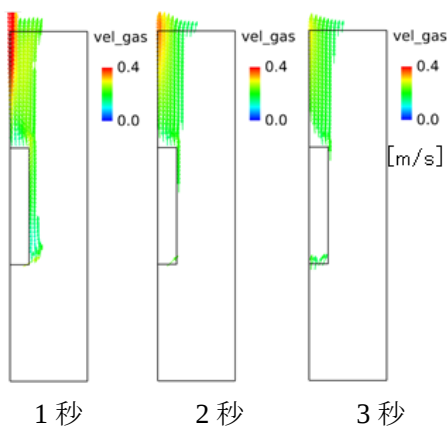


図 13 気相温度

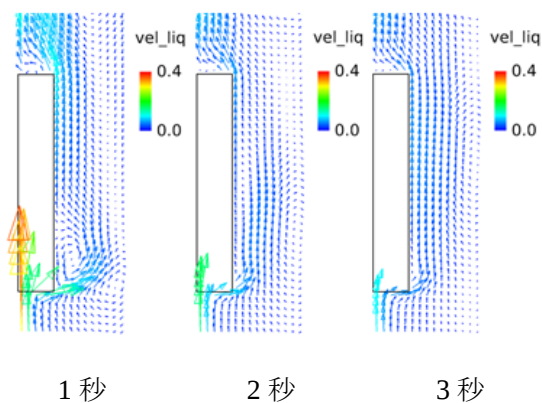
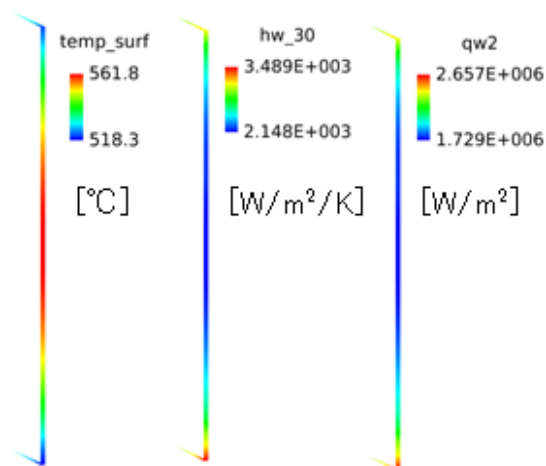


図 14 液相温度



表面温度 表面熱伝達率 熱流束
図 15 遷移沸騰時(1 秒)の結果

4.3. 沸騰解析 2

(1) 解析目的

冷却曲線の予測可能性をテストする。

(2) 解析条件

- ・ワークの材質：銀（相変態なし）
- ・ワーク形状：長さ 30mm、直径 10mm の円柱
- ・ワークの初期温度：800℃
- ・冷却材：油
- ・水槽内の初期液温：80℃

(3) 解析結果

冷却曲線の計算値と実験値[14]を図 7 に示す。

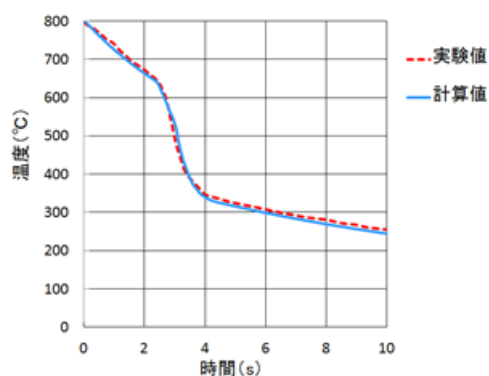


図 16 冷却曲線

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 17、図 188、図 19 に示す。

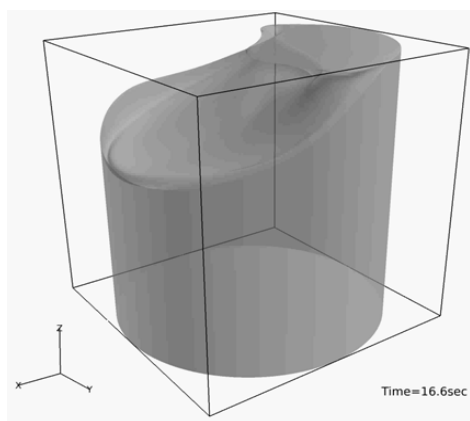


図 17 17 秒後の液面形状

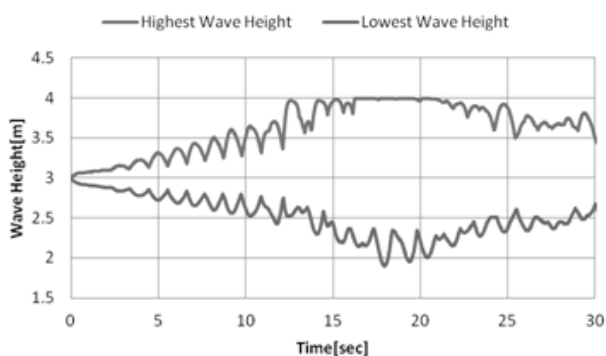


図 18 最大波高と最小波高の時間変化

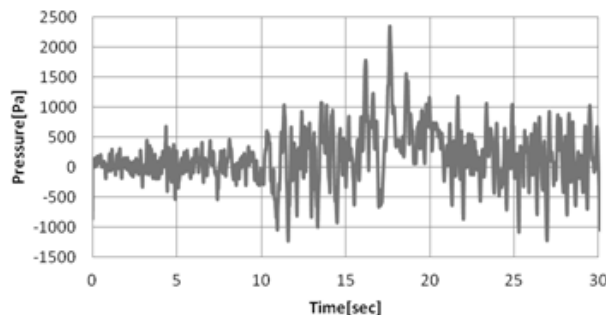


図 19 天板における最大圧力の時間変化

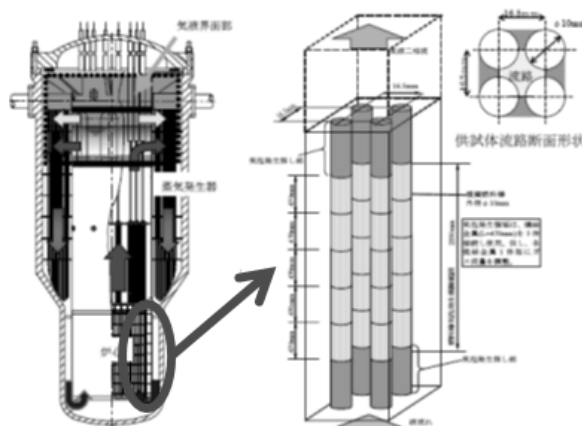
4.5. 気泡合体解析

(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可能性をテストする。

(2) 解析条件

- ・最下段のみから気泡を注入した試験

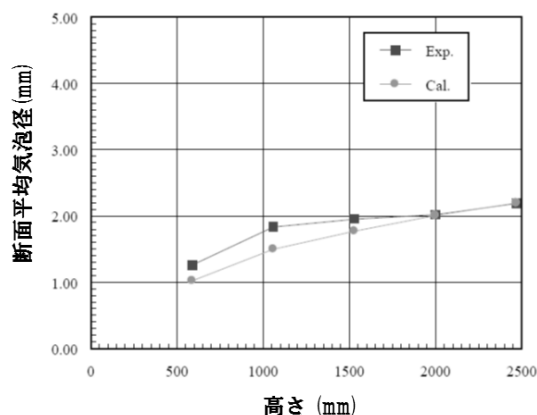


出典：
革新的実用原子力技術開発費補助事業
平成18年度成果報告書概要版
「高温高圧二相自然循環炉の熱流動シミュレーション評価手法の開発」

図 20 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 21 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 21 断面平均気泡径の高さ方向分布

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 22
- ・ 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

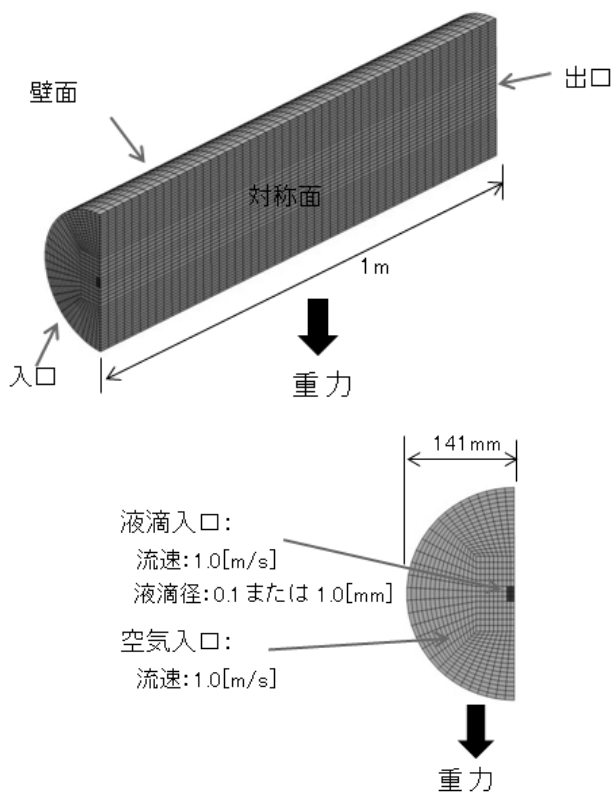


図 22 解析対象

(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 23、図 24、図 25、図 26 に示す。図 24 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 23 液滴の体積割合



図 24 蒸気の質量分率

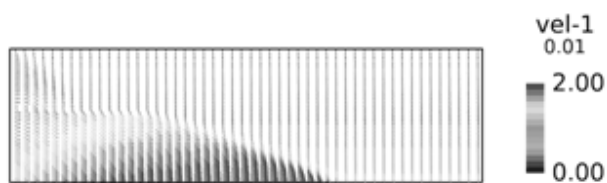


図 25 液滴速度



図 26 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

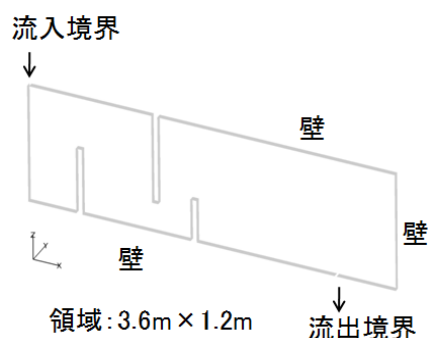
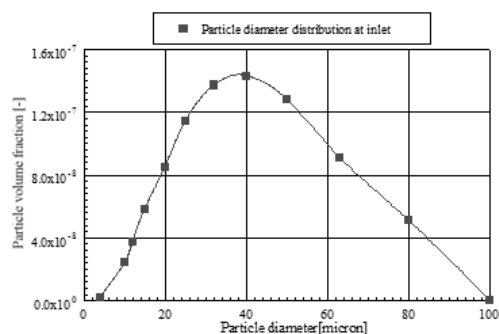


図 27 解析対象

- ・ 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 28 入口の粒径分布

(3) 解析結果

液相速度を図 29 に示す。

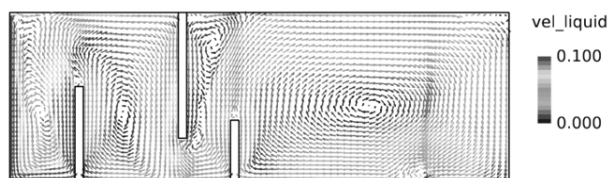


図 29 液相速度

粒径 25~80 μm の体積割合を図 30~図 34 に示す。



図 30 粒径 25 μm の体積割合



図 31 粒径 40 μm の体積割合



図 32 粒径 50 μm の体積割合



図 33 粒径 63 μm の体積割合



図 34 粒径 80 μm の体積割合

粒径 50 μm の生成・消滅速度を図 35 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 35 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 の概要、並列計算、解析事例を紹介した。今後も改良を続け、皆さま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。

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 Columns”, 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(1998), pp.84-93
- [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 535(1992), pp.527
- [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)
- [14] 奈良崎道治, “焼入れ冷却と焼入れシミュレーション”, 不二越, 15(2008), pp.5
- ※ 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。)