

気液二相流解析ソフトウェアAdvance/FrontFlow/MP による沸騰現象などの3次元気液二相流解析

第2事業部 杉中 隆史

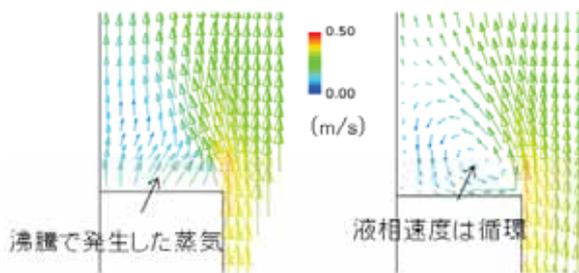
原子力安全解析セミナー
2014年11月27日（木）
アドバンスソフト株式会社

発表内容

- Advance/FrontFlow/MPとは？
- Advance/FrontFlow/MPの特長
- Advance/FrontFlow/MPの構成
- Advance/FrontFlow/MPの解析機能一覧
- Advance/FrontFlow/MPの原子力分野における解析事例
- 解析事例 沸騰を伴う解析①
- 解析事例 沸騰を伴う解析②
- 解析事例 凝縮を伴う解析
- 解析事例 相変化を伴わない気泡流解析①
- 解析事例 相変化を伴わない気泡流解析②
- 解析事例 自由表面解析
- 解析事例 気泡合体解析
- Advance/FrontFlow/MPのロードマップ

Advance/FrontFlow/MPとは？

Advance/FrontFlow/MPとは、**アドバンスソフト(株)**が開発し、**二流体モデル**(*)により、**非構造格子系**で気液二相流を解析するソフトウェアである。



同一メッシュにおいて、気相と液相の異なる速度や温度を、各相の非定常過程を考慮して計算できる。

(a)気相速度

(b)液相速度

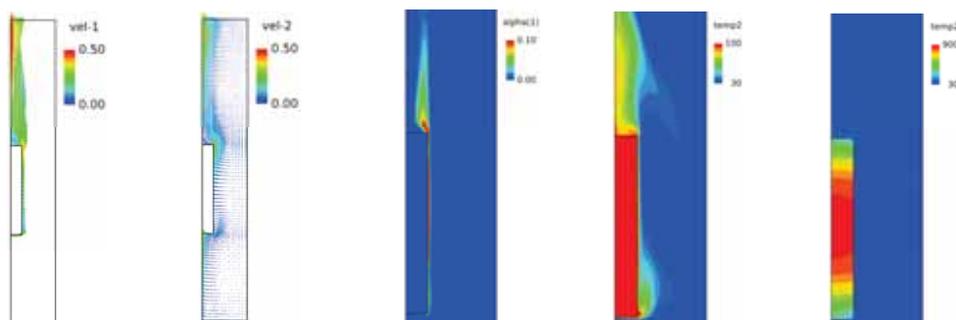
沸騰凝縮を伴う気液二相流と固体内熱伝導との連成解析

(*)二流体モデル:

- ・気相と液相で、質量・運動量・エネルギーの保存方程式を別々に解く。
- ・気液界面や壁面での質量・運動量・熱移動は、構成方程式(実験相関式)を使用する。
- ・メッシュ内に気泡や液滴が含まれても、それらの質量を保存できる。
→メッシュサイズや時間刻みが大きくとれ、大きなスケールの解析ができる。

Advance/FrontFlow/MPの特長

- ①沸騰や凝縮や自由表面の計算を安定に行うことができる。
- ②壁面熱伝達モデルなどの構成方程式が組み込まれている。
- ③気泡合体モデルにより、気泡群の個別運動と相互作用を扱える。
- ④凝集モデルにより、固体粒子群の個別運動と相互作用を扱える。



(a)気相速度

(b)液相速度

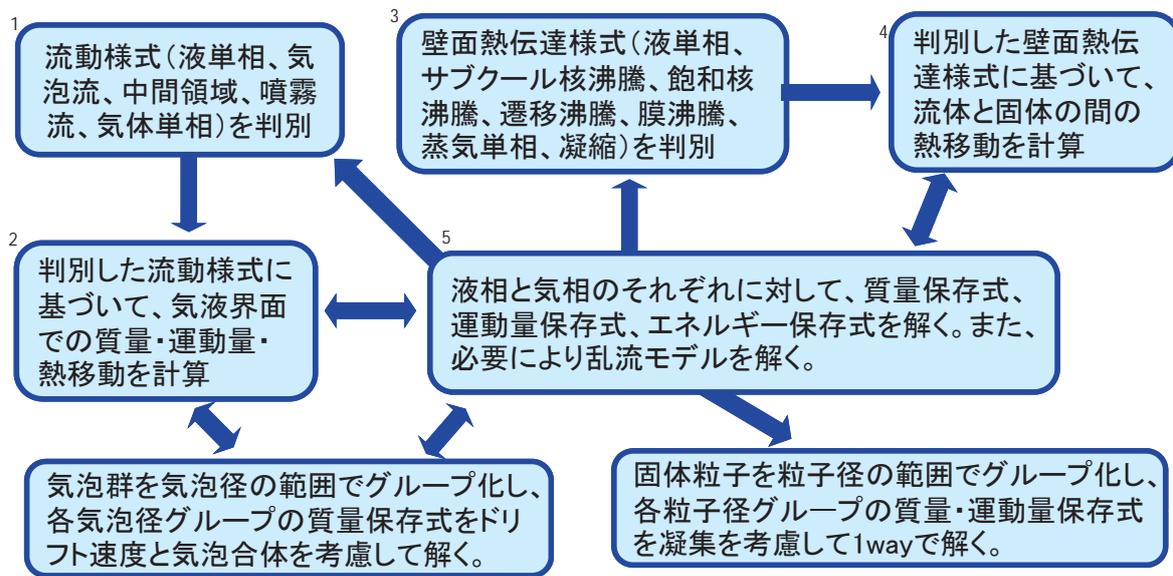
(c)ボイド率

(d)液相温度

(e)固体温度

沸騰凝縮を伴う気液二相流と固体内熱伝導との連成解析

Advance/FrontFlow/MPの構成



非構造格子を使用 ⇒ 形状模擬精度が高い。
 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の解析機能一覧(1/3)

項目	機能
物理モデル	<p>基本機能: 定常／非定常／非圧縮性／強制対流／自然対流／固体の熱伝導(固体内部の複数材質含む)</p> <p>乱流モデル: 混合型k-εモデル／分散型k-εモデル(気泡流用)／渦粘性一定／乱流モデルなし</p> <p>気液二相流の扱い: 二流体モデル</p> <p>蒸発問題での気液二相の扱い: 非凝縮ガス(例えば空気)と凝縮ガスの混合ガスを気相、液滴群を液相として、凝縮ガスの分布を計算</p> <p>気泡径分布変化: ポピュレーションバランス方程式</p> <p>気泡合体モデル: Prince&Blanchモデル／Luohモデル／Chestersモデル／Lehrモデル</p> <p>固体粒子の凝集: 粒径グループ毎の質量・運動量方程式(1way)</p>
構成方程式(実験関連式)	<p>流動様式: ボイド率で分類するモデル／ボイド率と質量速度で分類するモデル／混相は気泡流</p> <p>気泡径: 臨界ウェーバー数を使用した式／一定値</p> <p>液滴径: 臨界ウェーバー数を使用した式／一定値</p> <p>抗力係数: 神戸大・富山らの式／剛体球の式／一定値</p>

Advance/FrontFlow/MPの解析機能一覧(2/3)

項目	機能
構成方程式 (実験相関式)	<p>揚力係数: 神戸大・富山らの式／一定値／使用しない</p> <p>壁面潤滑力: Antalらのモデル／使用しない</p> <p>乱流拡散力: Lopezらのモデル／使用しない</p> <p>仮想質量力: 一定値／使用しない</p> <p>最小安全膜沸騰温度: 液温と壁温と圧力による相関式／一定値</p> <p>限界熱流束温度: Chenの核沸騰相関式とZuberの限界熱流束相関式から求める方法／一定値</p> <p>界面熱伝達: 気泡流／噴霧流／中間領域</p> <p>壁面熱伝達率: 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／組み込み式の修正／一定値</p>
メッシュ 形状	6面体(ヘキサ)／4面体(テトラ)／3角柱(プリズム)／4角錐(ピラミッド)／これらメッシュの混合
離散化	有限体積法／節点中心法
アルゴ リズム	SIMPLE法／Rhie-Chow補間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

7

Advance/FrontFlow/MPの解析機能一覧(3/3)

項目	機能
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	1次精度風上差分／2次精度風上差分／2次精度中心差分／2次精度風上差分+リミタ(TVD法)／2次精度中心差分と1次精度風上差分のブレンド
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	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／界面摩擦モデル／壁面熱伝達モデル／相変化速度／気泡合体のソースターム

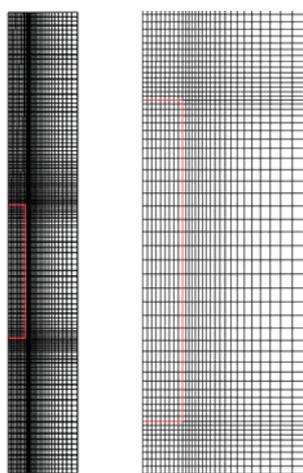
Advance/FrontFlow/MPの 原子力分野における解析事例

- 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
- 配管の沸騰・凝縮による熱疲労解析
- 気泡流解析
- 高温固体と気液二相流の沸騰・凝縮を伴う熱連成解析

解析事例 沸騰を伴う解析①

(目的) 沸騰凝縮を伴う気液二相流と固体内熱伝導との連成機能の検証

円柱の長さ: 32mm
円柱の直径: 8mm



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秒間の冷却曲線を計算して、文献[1]の実験値と比較する。

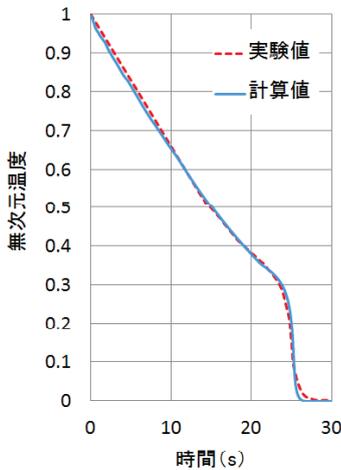
- (1) 時間刻み: 0.005秒一定
- (2) 現象時間: 30秒
- (3) 節点数: 10,503
- (4) 基礎方程式: 二流体モデルと固体の熱伝導方程式
- (5) 流動様式: ボイド率から液体单相、気泡流、中間領域、噴霧流、気体单相に分類して、各構成方程式を使用
- (6) 気泡流の界面摩擦力: 富山らの式
- (7) 噴霧流の界面摩擦力: 剛体球の式
- (8) 中間領域の界面摩擦力: 気泡流と噴霧流の界面摩擦力を3次式で補間
- (9) 壁面熱伝達: 液单相、サブクール核沸騰、飽和核沸騰、遷移沸騰、膜沸騰、気体单相に分類して、各構成方程式を使用
- (10) 最小安全膜沸騰温度: 実験値を使用

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. 10

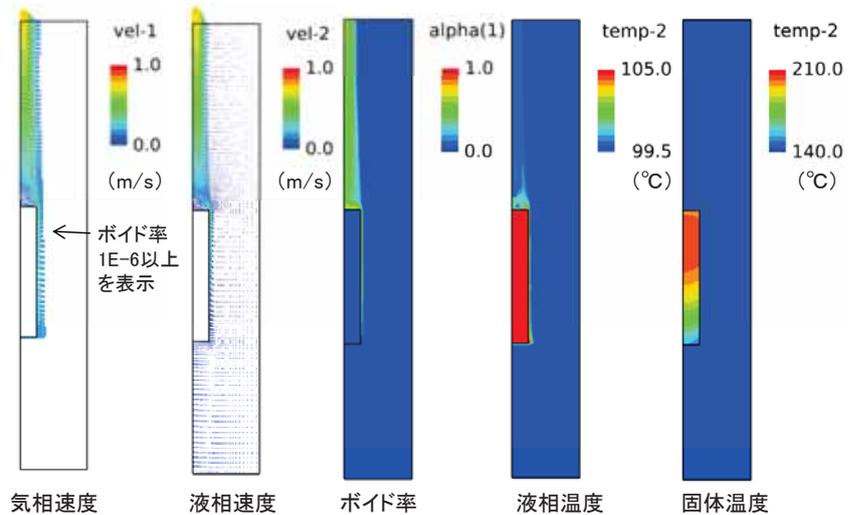
解析事例 沸騰を伴う解析①

円柱中央位置の冷却曲線



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

25秒後(遷移沸騰時)の計算結果



計算時間 OS : CentOS
 CPU : Intel(R) Xeon(R), 2.80GHz
 コンパイラー : 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

解析結果:構成方程式をフィッティングすれば冷却曲線の実験値を再現することが可能。

解析事例 沸騰を伴う解析②

(目的) 30°Cの液体に900°Cの固体を入れた時の沸騰解析

■ 解析条件

- ・ 固体形状 : 長さ32mm、直径8mmの円柱
- ・ 固体の材質 : 金属(相変態は考慮しない)
- ・ 固体の初期温度 : 900°C
- ・ 液体の初期温度 : 30°C
- ・ 壁面の熱伝達様式 : 「気体単相の対流」、「膜沸騰」、「遷移沸騰」、「飽和核沸騰」、「サブクール核沸騰」、「液体単相の対流」に区別して、熱伝達様式に応じた構成方程式
- ・ 固体角部での蒸気膜崩壊の扱い
 - Case1 : 特別なモデルを使用しない。
 - Case2 : 壁面に隣接するボイド率が限界値以下になったら蒸気膜が崩壊する。

■ 計算時間

- ・ OS : CentOS
- ・ CPU : Intel(R) Xeon(R), 2.80GHz
- ・ コンパイラー : Intel
- ・ 時間刻み : 0.03sec
- ・ 現象30秒(1000step)の計算時間

ケース	シングル	並列数2
Case1	39分07秒	20分34秒
Case2	39分39秒	20分40秒

解析事例 沸騰を伴う解析②

■ 計算格子 自由流出・自由流入条件

節点数: 10,503
(節点中心法のため奥行き3点)

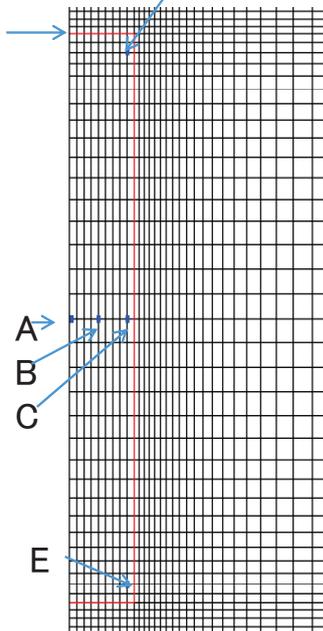
赤色は固体の外形線

中心軸

全体図

赤色は固体の外形線

4mm D

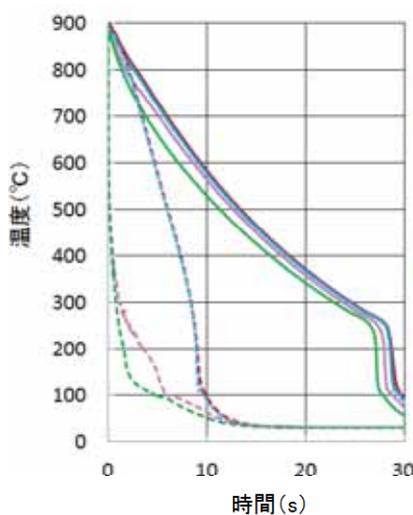


free-slip・断熱条件

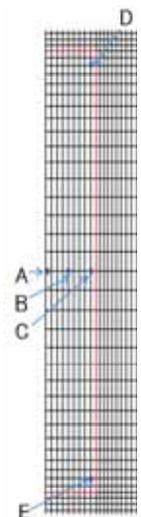
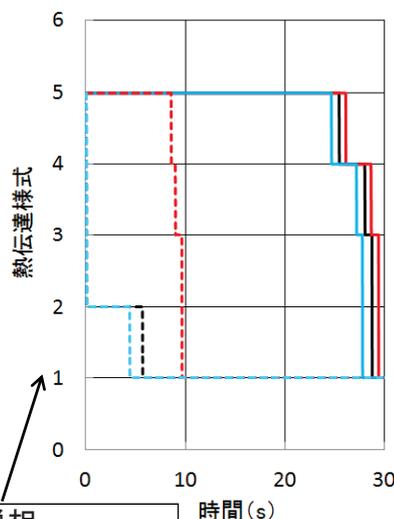
拡大図(冷却曲線の出力位置A,B,C,D,E)

解析事例 沸騰を伴う解析②

■ 冷却曲線



■ 熱伝達様式の時間変化



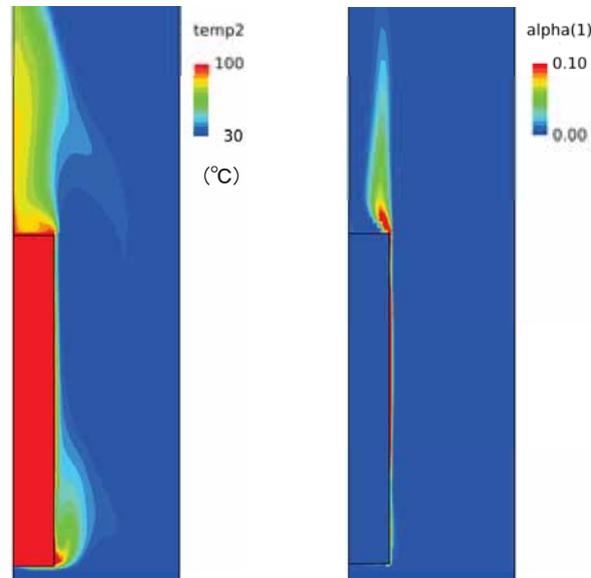
Case2では、コーナー付近のDとEは蒸気膜が崩壊して固液が接触して急冷し、その影響がAに及ぶ。

- 6: 気体単相
- 5: 膜沸騰
- 4: 遷移沸騰
- 3: 飽和核沸騰
- 2: サブクール核沸騰
- 1: 液体単相

Case2では、コーナー付近のDとEはすぐに「サブクール核沸騰」状態になる。

解析事例 沸騰を伴う解析②

■温度とボイド率(Case2の1秒後)



液相と固体の温度

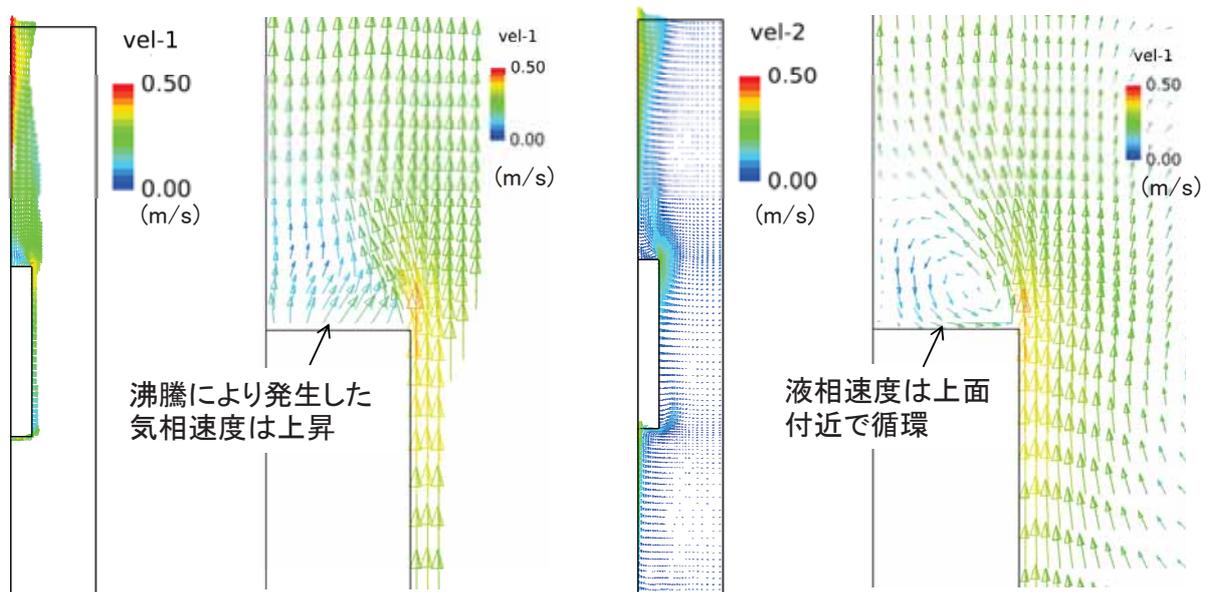
ボイド率

レンジの最大値を超える場所は赤色で表示

解析事例 沸騰を伴う解析②

■速度(Case2の1秒後)

気相速度はボイド率が 10^{-4} 以上の場所を表示



沸騰により発生した気相速度は上昇

液相速度は上面付近で循環

気相速度(全体図)

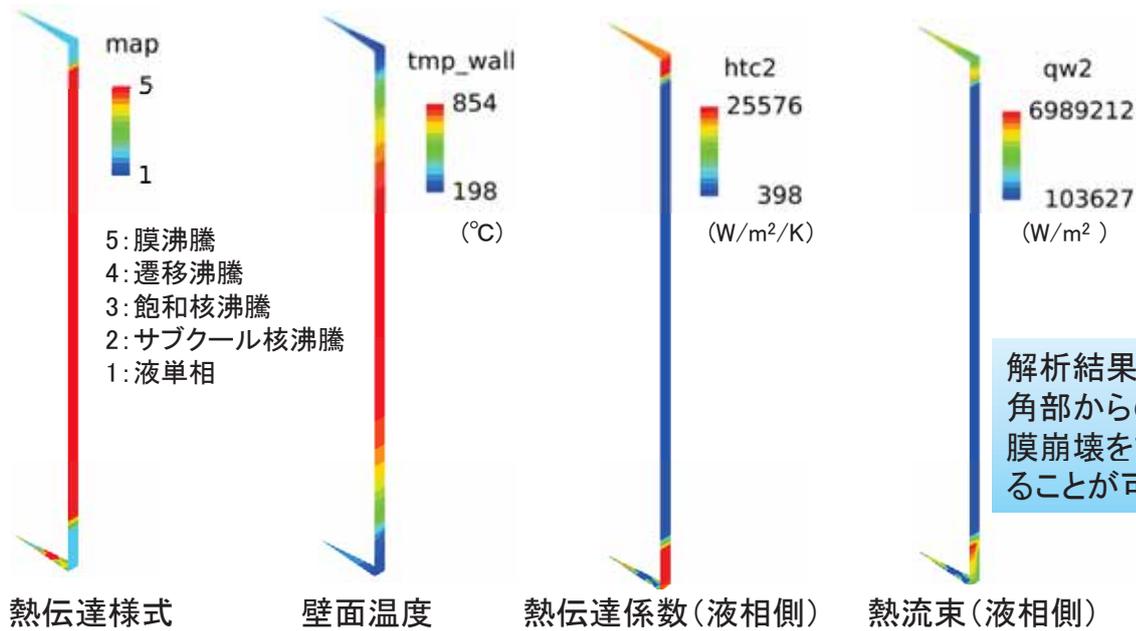
気相速度(拡大図)

液相速度(全体図)

液相速度(拡大図)

解析事例 沸騰を伴う解析②

■壁面上の物理量(Case2の1秒後)



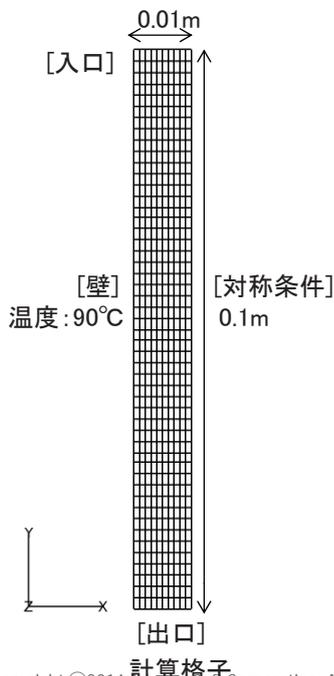
解析事例 凝縮を伴う解析

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の検証

■解析条件

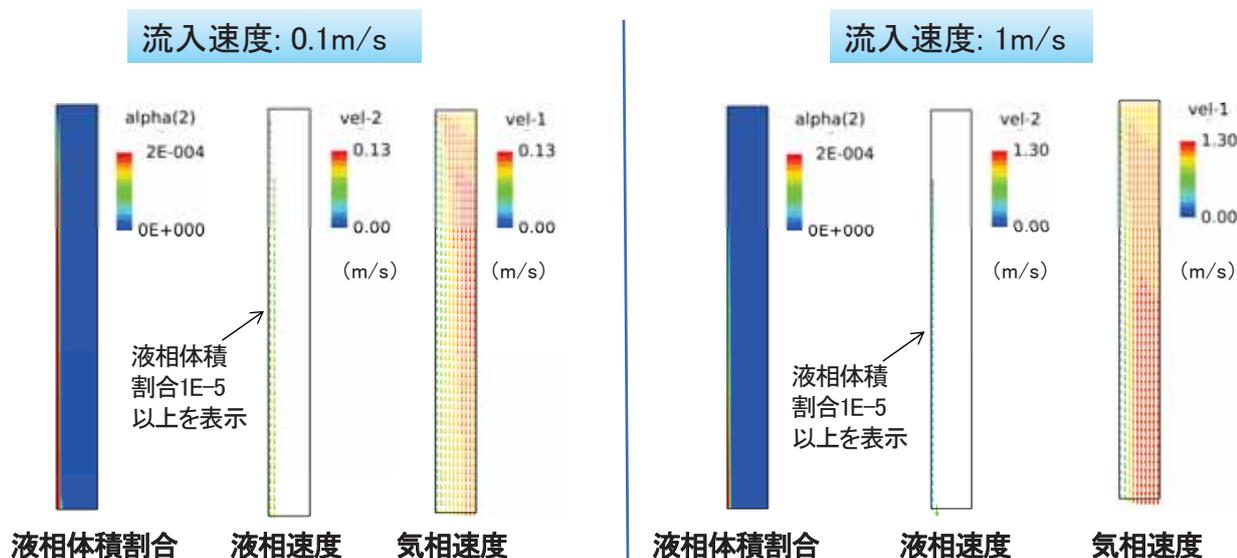
- ・時間刻み: 1秒一定
- ・メッシュ形状: ヘキサ
- ・節点数: 1,683
- ・流動様式: ボイド率から液体单相、気泡流、間領域、噴霧流、気体单相に分類して、各構成方程式を使用
- ・噴霧流の界面摩擦力: 剛体球の式
- ・壁面熱伝達: 凝縮熱伝達係数^[1]
- ・飽和温度: 100°C
- ・流体の物性値: 1気圧、100°Cの物性値
- ・流体の初期温度: 100.1°C
- ・境界条件: 左の図を参照



[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 凝縮を伴う解析

■解析結果



解析結果：時間刻み1秒で凝縮を安定に計算することが可能。

解析事例 相変化を伴わない気泡流解析①

(目的) 気液二相流解析の基本機能の精度検証

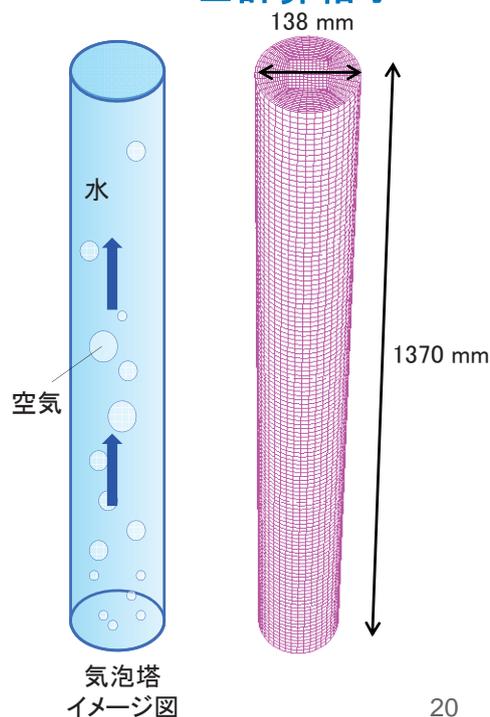
- ・反応器の性能評価
- ・流体の混合や気液相間での輸送と反応器の設計条件や実験条件の関係を解明
- ・気泡塔(気液反応装置)底面からの気体流入時の気相体積割合(ガスホールドアップ/ボイド率)と液相速度の実験値*の再現性の検証

* J.H.Hills, Trans.Instn.Chem.Engrs, Vol52,1971,pp1-9

■解析条件

- ・気泡径: 3 mm
- ・物性値 液相: 密度 1000 kg/m³
気相: 密度 1.2 kg/m³
- ・ガス通気量: 空塔速度 3.8 cm/s
- ・流動様式(構成方程式): 気泡流
- ・解析格子 91,000

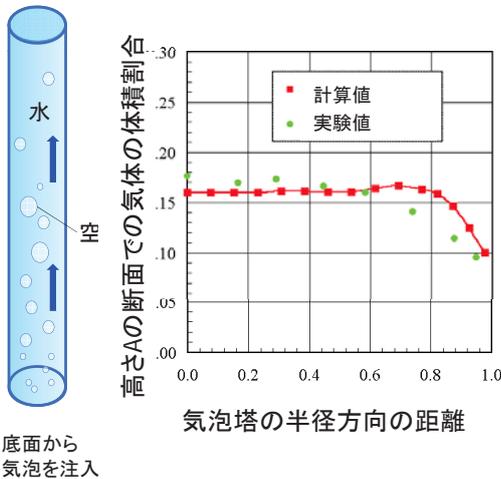
■計算格子



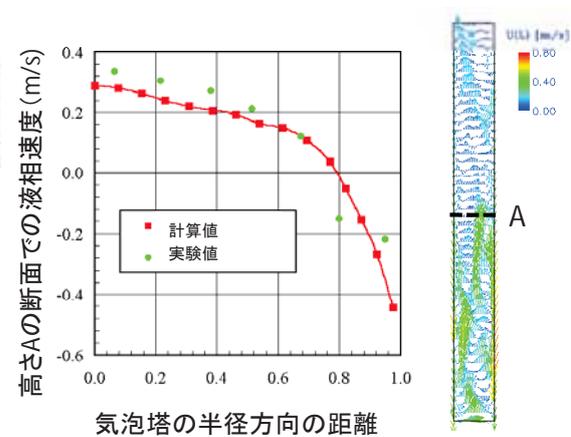
解析事例 相変化を伴わない気泡流解析①

■ 解析結果

ボイド率: 実験値と計算値の比較



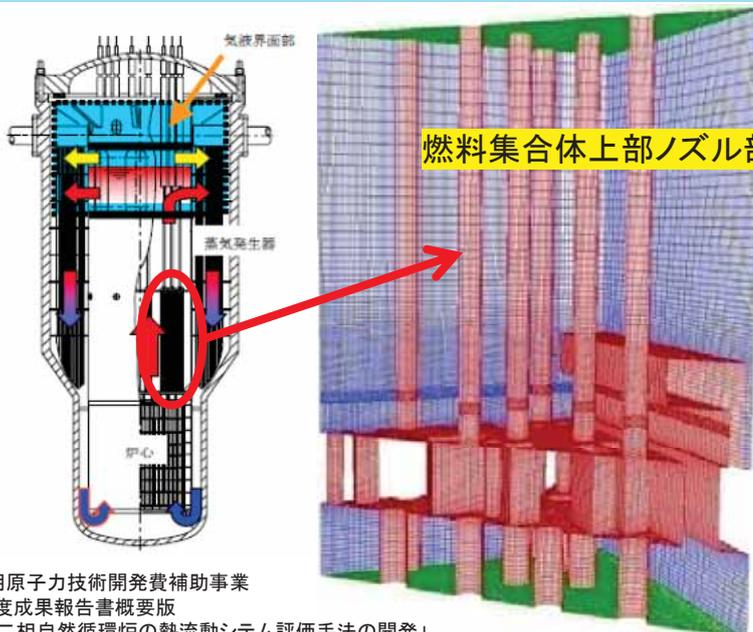
液相速度: 実験値と計算値の比較



解析結果: 実験値に近い値を再現。

解析事例 相変化を伴わない気泡流解析②

(目的) 燃料集合体上部ノズル部において、複雑に変化する流路形状が気液二相流挙動に与える影響を評価する。



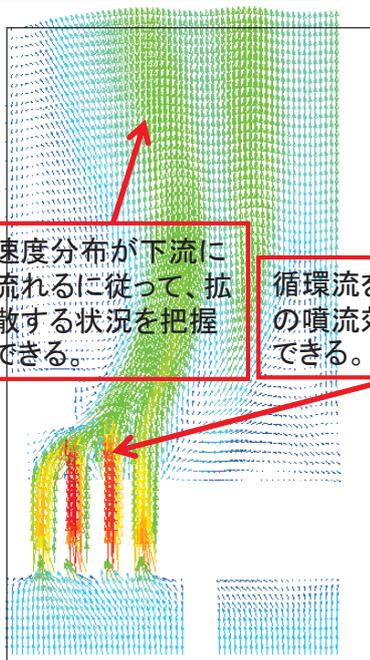
- 格子形状:
 - 6面体格子
 - 5面体格子
 - 4面体格子
 } 併用
- 解析格子数: 要素数170万

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」

解析事例 相変化を伴わない気泡流解析②

■ 解析結果

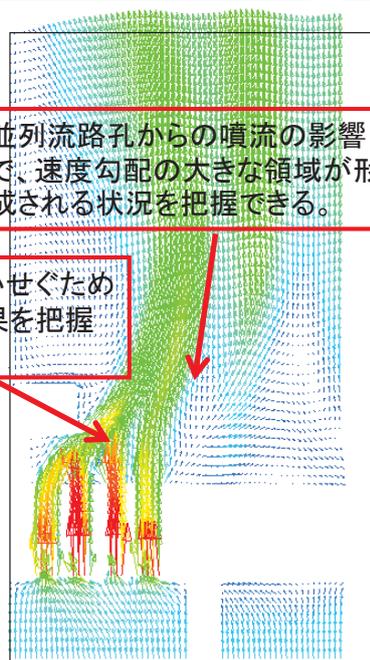
解析結果: 液相速度



速度分布が下流に流れるに従って、拡散する状況を把握できる。

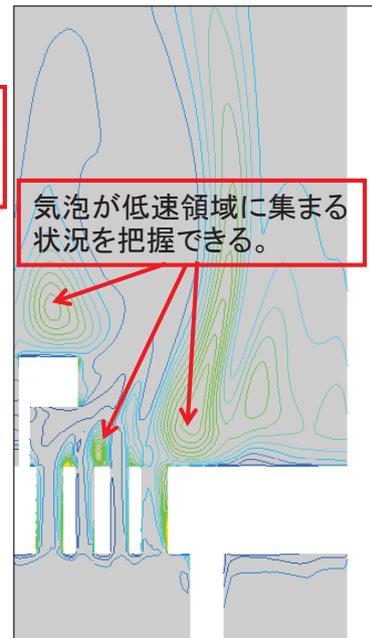
循環流をかせぐための噴流効果を把握できる。

解析結果: 気相速度



並列流路孔からの噴流の影響で、速度勾配の大きな領域が形成される状況を把握できる。

解析結果: 水蒸気の体積割合



気泡が低速領域に集まる状況を把握できる。



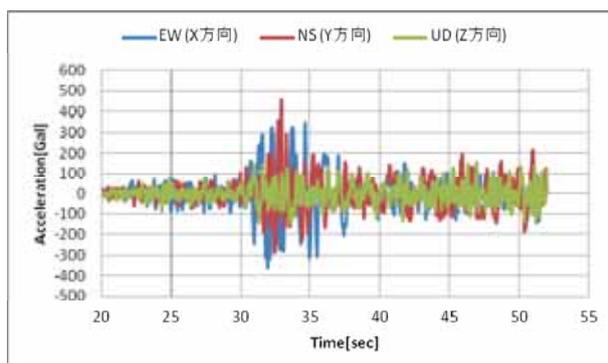
出典: 革新的実用原子力技術開発費補助事業 平成18年度成果報告書概要版
「高温高圧二相自然循環炉の熱流動システム評価手法の開発」

解析事例 自由表面解析

■ 解析条件

(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の検証

- 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 X,Y,Z方向同時入力 (解析では20[s]を0[s]とした)

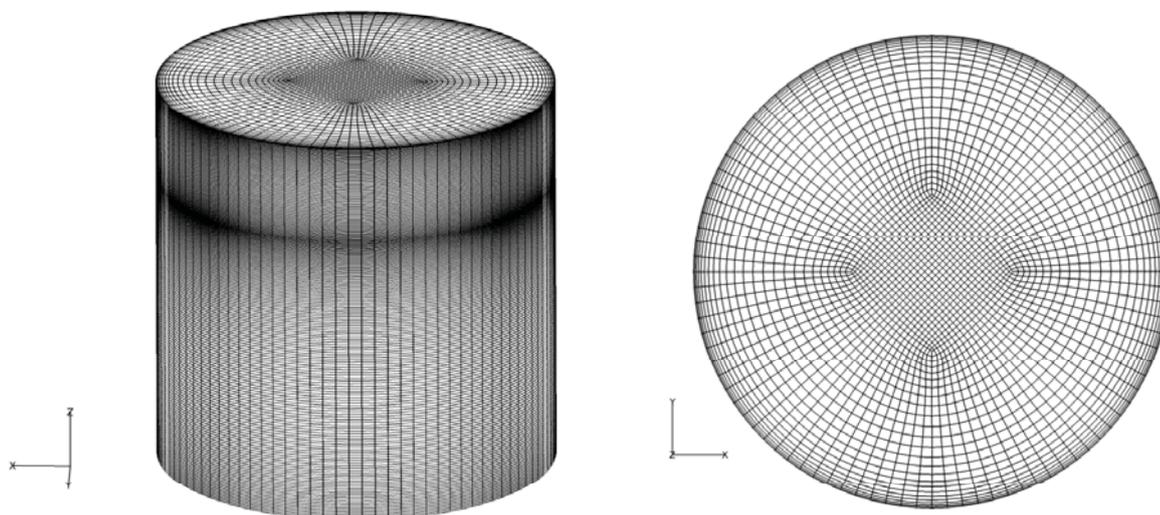


*翠川三郎, 三浦弘之: 1968年十勝沖地震の八戸港湾での強震記録の再数値化, 日本地震工学会論文集, 第10巻, 第2号, pp.12-21, 2010
http://www.enveng.titech.ac.jp/midorikawa/open_data.html

解析事例 自由表面解析

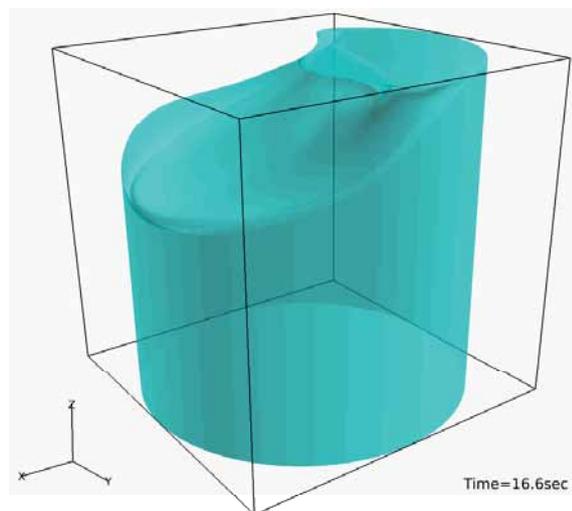
■ 計算格子

周方向: 96分割
高さ方向: 200分割
節点数: 588,729

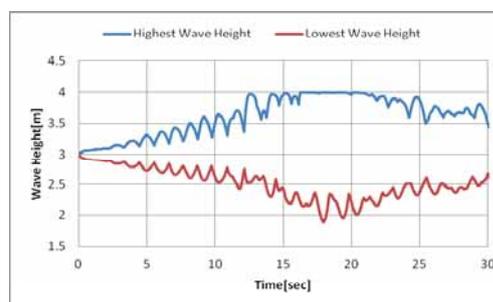


解析事例 自由表面解析

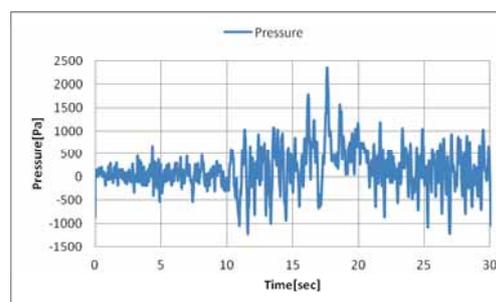
■ 解析結果



解析結果:地震による表面挙動や波高・圧力の時間変化を計算することが可能。



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 気泡合体解析

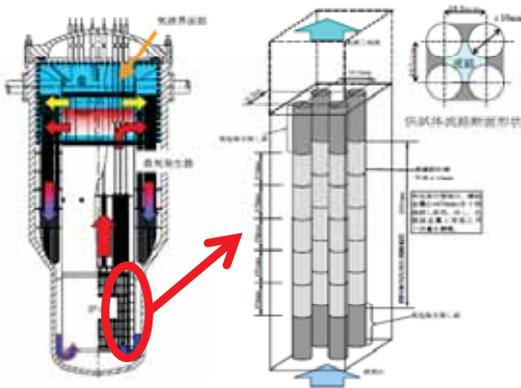
(目的) 新型炉(自然循環炉)燃料集合体試験のサブチャンネル解析

■ 解析条件

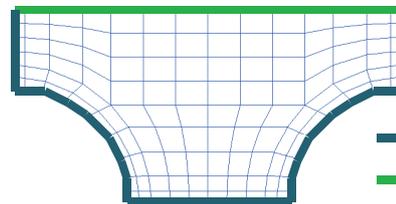
- ・通常運転を想定した代替流体の気液二相流 (気相: 六フッ化硫黄、液相: エタノール)
- ・高レイノルズ数型のk-εモデルを適用
- ・壁面には壁関数を適用
- ・最下段のみから気泡を注入した試験
- ・気泡は、0.1mmから5mmまでを5群で考慮

■ 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」

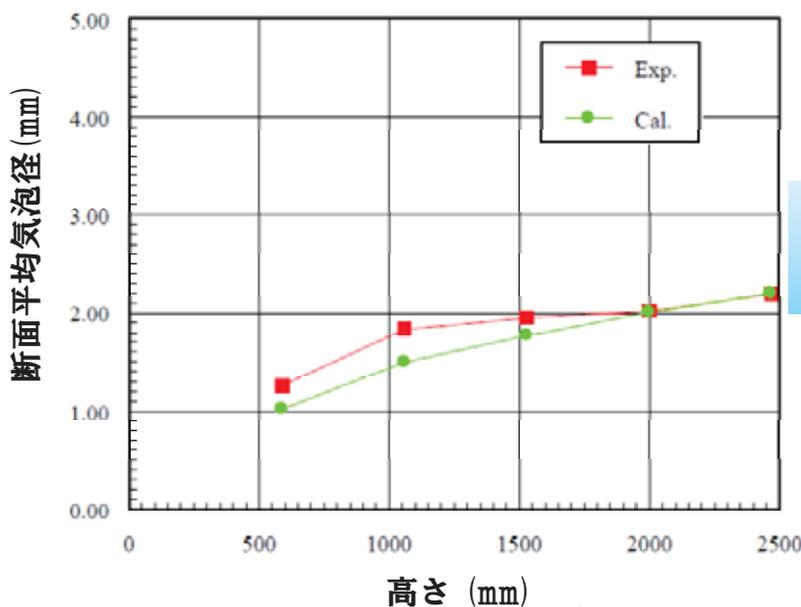


— 壁面
 — 対称面

解析事例 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

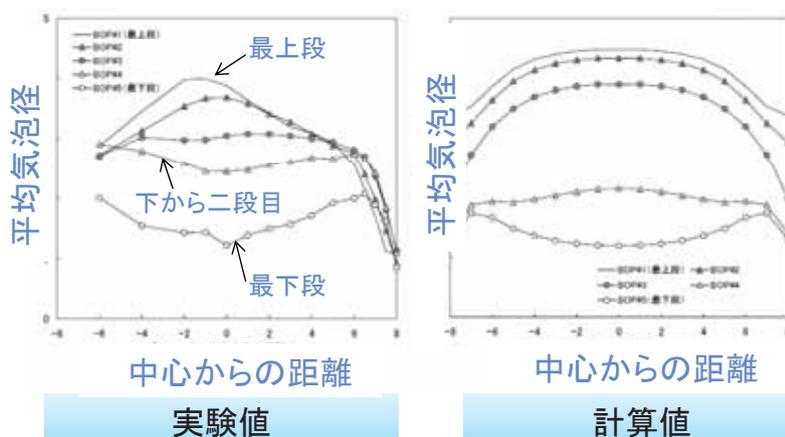


解析結果: サブチャンネル内の上昇に伴って気泡径が増大する実験値を再現。

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 気泡合体解析

■解析結果



解析結果: 以下の実験値を再現

- ① 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
- ② 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

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」

Advance/FrontFlow/MPのロードマップ

■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組み込み
- 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)

- テトラメッシュ対応(メッシュ作成を簡単化)
- 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)

