

炉内熱流動解析モデリング&シミュレーションの現状と課題

三沢 丈治, 吉田 啓之, 高瀬 和之

¹ 日本原子力研究開発機構・機構論的熱設計手法開発グループ

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

{[misawa.takeharu](mailto:misawa.takeharu@jaea.go.jp), [yoshida.hiroyuki](mailto:yoshida.hiroyuki@jaea.go.jp), [takase.kazuyuki](mailto:takase.kazuyuki@jaea.go.jp)}@jaea.go.jp

地震発生時における沸騰水型軽水炉(BWR)燃料集合体においては、地震加速度の影響により、サブチャンネル内の流速分布やボイド率分布などの沸騰二相流挙動が時間的に変動し、その結果、炉心耐力に影響する被覆管表面温度なども変動することが考えられる。そのため、地震動に対する炉心耐力を評価するには、地震時の沸騰二相流挙動を評価する必要がある。

日本原子力研究開発機構では、原子炉機器内における沸騰二相流挙動を評価することを目的として、3次元二相流解析コードACE-3Dを開発している。ACE-3Dコードは、沸騰二相流を気相体積割合(ボイド率)によりモデル化する3次元二流体モデル、及びk-εモデルをベースとする二相乱流モデルを採用し、境界適合座標系やマルチブロック解析機能、及び並列計算機能を有することで、燃料集合体内の沸騰二相流を効率的かつ高精度で解析できる。本研究では、ACE-3Dコードを拡張し、地震時の炉内沸騰二相流を評価できる熱流動解析手法の開発を目的とする。

ACE-3Dコードにより地震時の沸騰二相流を評価するためには、地震動に起因する燃料棒変形への対応、地震加速度が炉内沸騰二相流挙動に与える影響の評価、炉心出力変動などの影響の付加、があげられる。これらのうち、平成20年度は、地震時に発生する燃料棒変形を模擬した体系に対し、ACE-3Dコードが適用できることを確認した。

平成21年度は、地震加速度が炉内沸騰二相流挙動に与える影響の評価と地震時の炉心出力変動などの影響を付加するため、流体への地震加速度付加機能や非定常境界条件付加機能を追加した。付加した解析機能の妥当性を確認するとともに、地震加速度が沸騰二相流に及ぼす影響因子を抽出するため、加熱平板内沸騰二相流を対象にしたテスト計算を実施した。また、改良したACE-3Dコードの実炉条件への適用性を確認するため、米国Peach Bottom 2号炉の7×7燃料集合体内における2×2サブチャンネルを解析対象とし、実地震データを簡略模擬した地震加速度を付加した条件で沸騰二相流解析を実施した。

一連の解析を行い、次の成果を得た。

- 1) 地震加速度や非定常境界条件を任意に設定できる機能を追加し、テスト計算を行って、付加した解析機能の妥当性を確認した。
- 2) 燃料集合体を簡略模擬した体系で、地震加速度を与えた条件で沸騰二相流解析を実施できることを確認した。
- 3) 地震加速度が沸騰二相流に及ぼす影響因子について数値的に明らかにした。

次年度は、地震加速度が沸騰二相流に及ぼす影響因子を広い範囲の条件に対して明らかにするとともに、炉内機器構造解析及び核熱連成解析とデータ連携し、地震時における実炉を模擬した解析による総合評価を行う予定である。

炉内熱流動解析モデリング& シミュレーションの現状と課題

三沢丈治

日本原子力研究開発機構
機構論的熱設計手法開発Gr

背景と目的

- 地震時のBWR燃料集合体
 - 時間的に変化する燃料集合体内沸騰二相流挙動の評価が必要
- 3次元二流体モデル解析コード ACE-3D
 - 日本原子力研究開発機構で開発中
 - 3次元二流体モデル, 二相乱流モデル, 境界適合座標系 (BFC)機能, マルチブロック解析機能など
 - BWR燃料集合体内沸騰二相流解析で実績

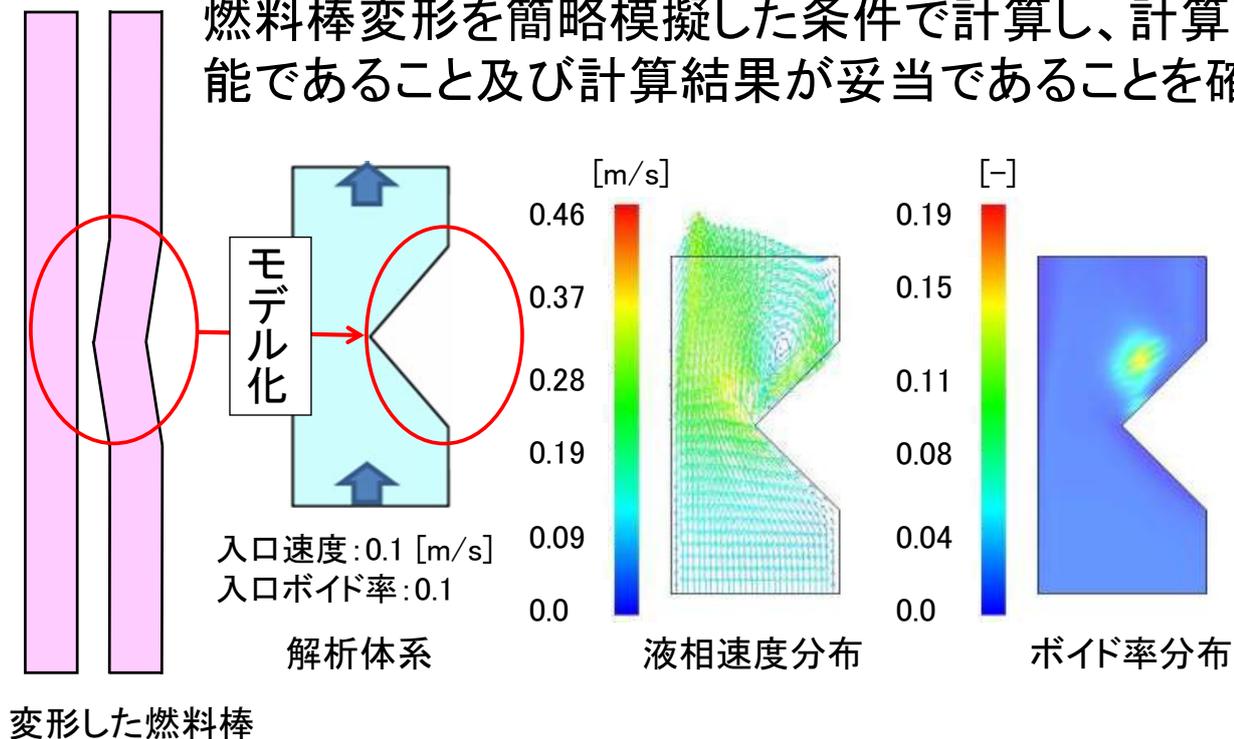
地震時の燃料集合体内沸騰二相流解析手法の開発

解析手法開発における課題

1. 燃料棒変形などによる流路形状変化への対応
 - 複雑流路形状における解析の妥当性評価
2. 地震が熱流動挙動に与える影響の評価
 - 非定常境界条件付加機能の導入
 - 地震時に燃料集合体内で時間的に変化する流量、温度、圧力などを考慮した解析を可能とする
 - 影響因子の抽出
3. 実炉心解析による評価
 - 機器構造解析, 核熱連成解析とのデータ連携

平成20年度の成果

燃料棒変形を簡略模擬した条件で計算し、計算可能であること及び計算結果が妥当であることを確認



平成21年度の実施内容

1. 非定常境界条件付加機能を導入

- 時間的に変動する境界値の時系列データを各時刻ごとに補間して境界条件として反映
 - 地震加速度、流入出条件、壁面熱流束

2. 非定常境界条件付加機能を用いたテスト計算

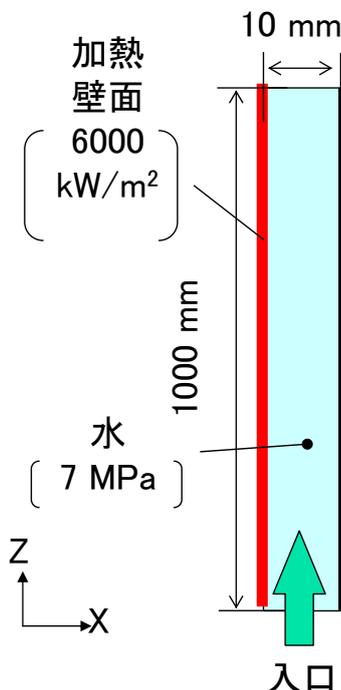
- 非定常境界条件の機能確認
- 地震加速度が沸騰流に及ぼす影響因子を抽出

3. 非定常境界条件付加機能を用いた燃料集合体内沸騰流解析の実施

- 燃料集合体体系での機能確認

非定常境界条件を用いたテスト計算 (1/4) 計算条件

解析対象：片面加熱時の平板内沸騰流



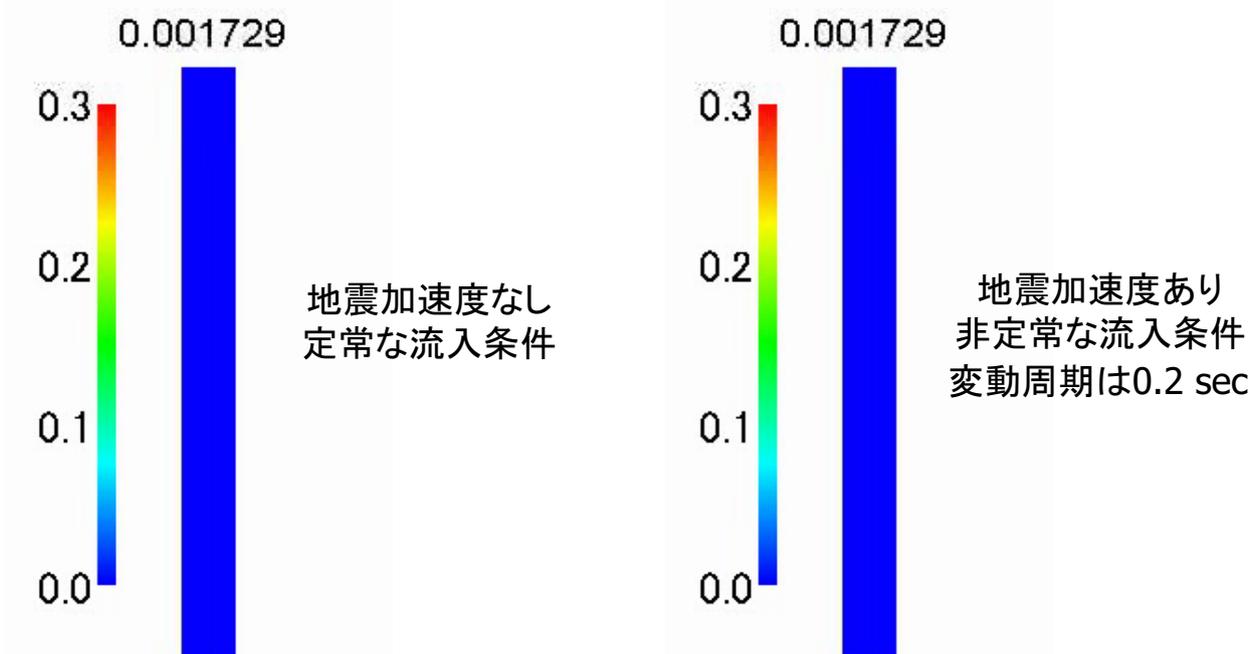
非加熱壁面

計算条件

		初期値	振幅	周期
地震 加速度	X方向	0	+1 m/s ²	0.2 sec 0.04 sec
	Z方向	0	-1 m/s ²	
流入 条件	入口 流速	3 m/s	0.5 m/s	0.2 sec
	入口 温度	550 K	-5K	

非定常境界条件を用いたテスト計算 (2/4) 非定常境界条件の機能確認

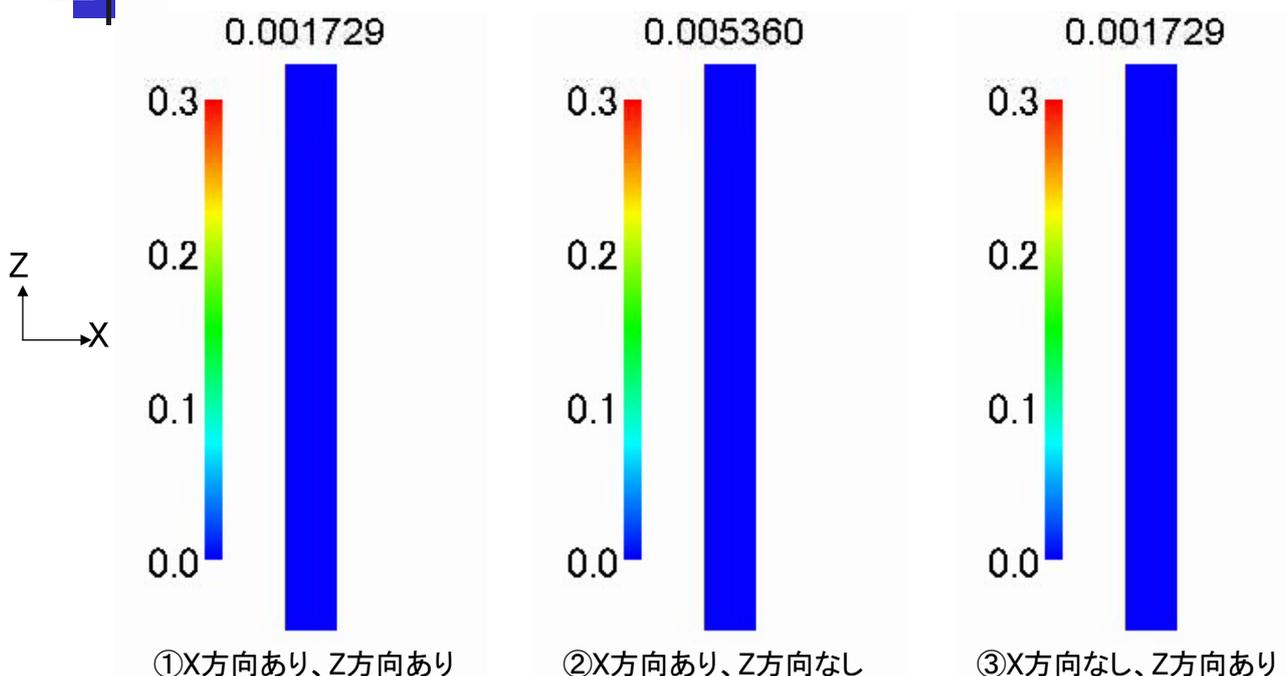
ポイド率分布の比較



確認事項 ・非定常境界条件を反映した計算が実施可能であることを確認

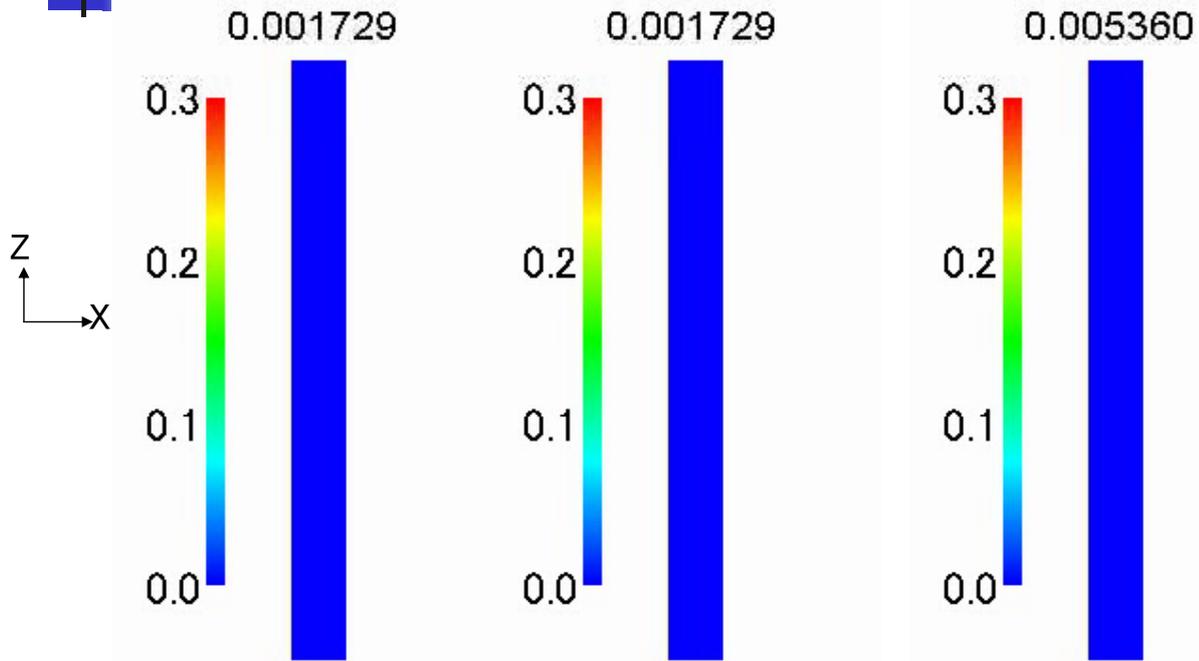
非定常境界条件を用いたテスト計算 (3/4) 地震加速度の影響

地震加速度付加時のポイド率分布 (周期 0.2 sec)



- 確認事項
- 地震加速度と同じ周期でポイド率が変動
 - Z方向よりもX方向の地震加速度のほうが影響が大きい

非定常境界を用いたテスト計算 (4/4) 周期の影響



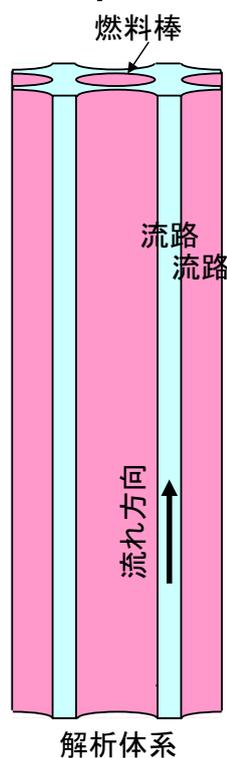
①地震加速度なし

②0.04s、X方向あり、Z方向なし

③0.2s、X方向あり、Z方向なし

確認事項 ■ 周期が大きくなるほど地震加速度の影響は顕著になる

地震加速度付加時の沸騰流解析 (1/5) 熱流動計算条件



地震加速度を付加した燃料集合体内沸騰流解析を実施

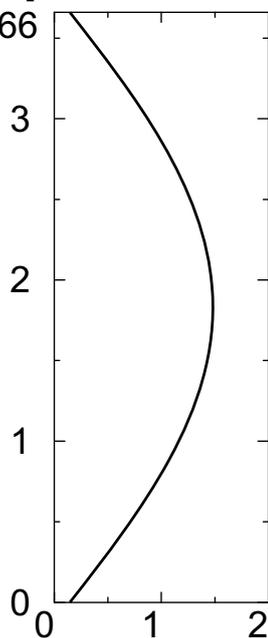
燃料集合体の体系

- ・Peach Bottom2号炉の7x7燃料集合体内の2x2サブチャンネルを模擬
- ・燃料棒直径 10.8 mm
- ・燃料棒間ギャップ幅 4.4 mm

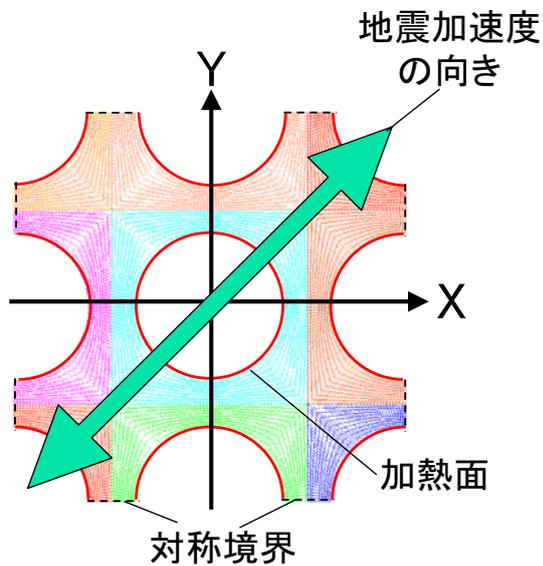
入力条件

圧力	7.1 MPa
入口質量速度	1673 kg/m ² s
加熱量	351.9 kW
入口温度	549.15 K

軸方向出力分布



地震加速度付加時の沸騰流解析 (2/5) 地震加速度条件



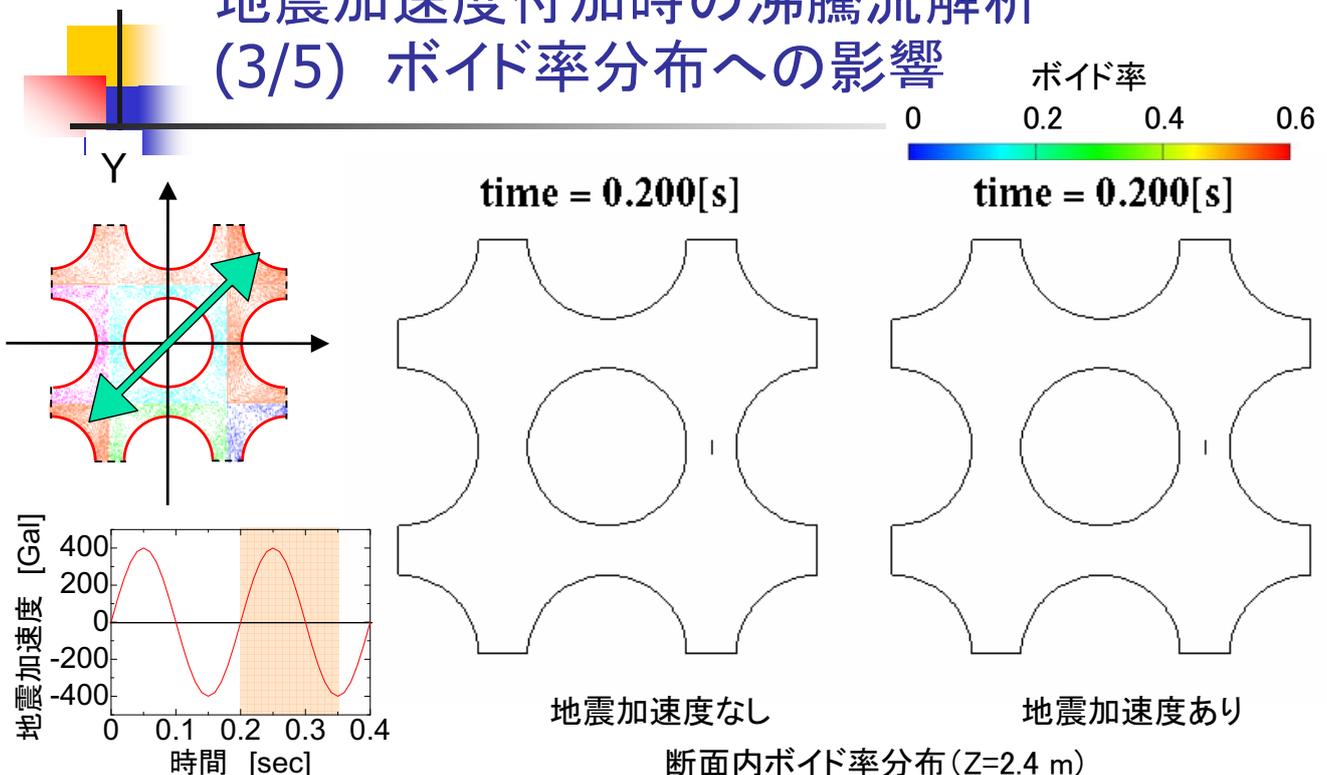
断面内メッシュ図
および境界条件

検討した地震加速度

波形	正弦波
振幅	400 Gal
周期	0.2 sec
方向	x, y, z方向 ともに同一

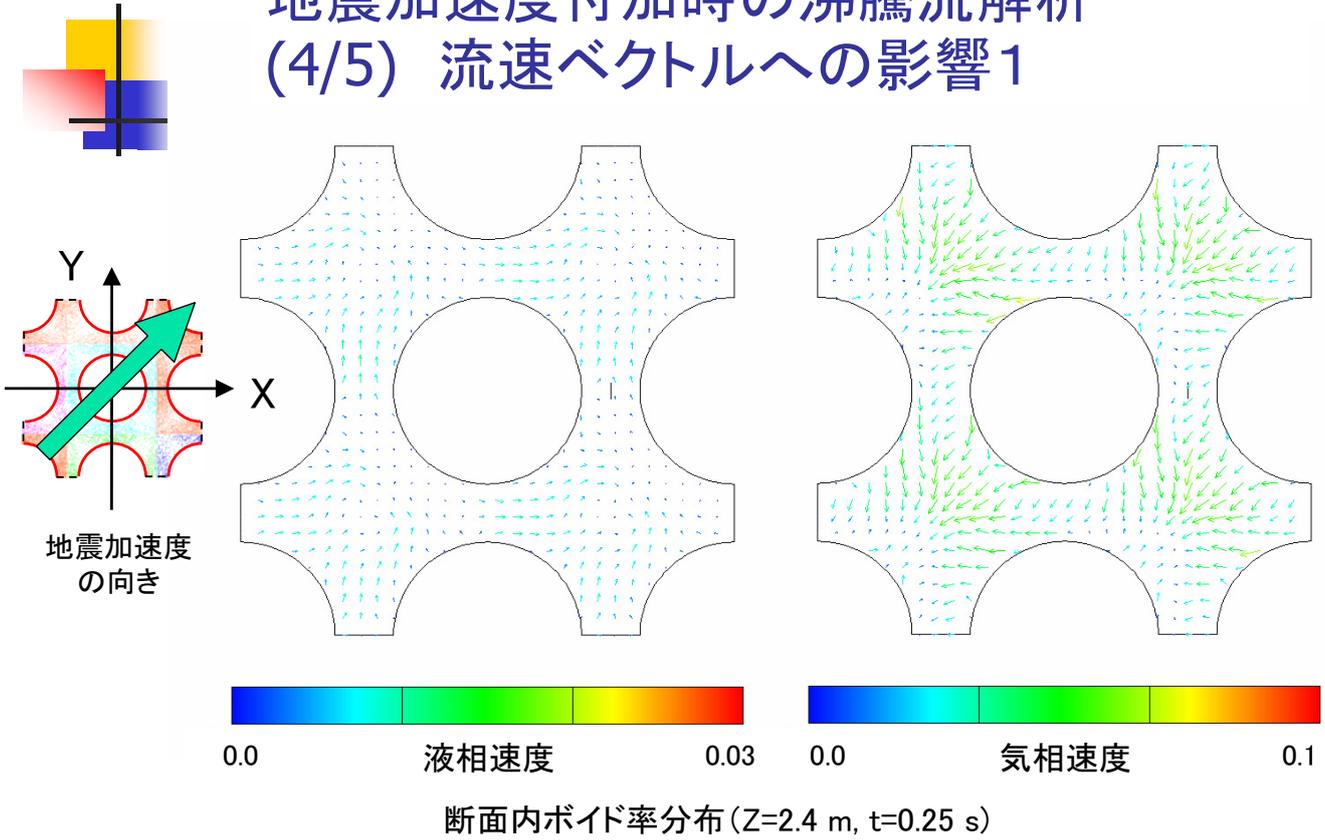
〔実地震データの地震加速度を
正弦波に簡略模擬〕

地震加速度付加時の沸騰流解析 (3/5) ボイド率分布への影響

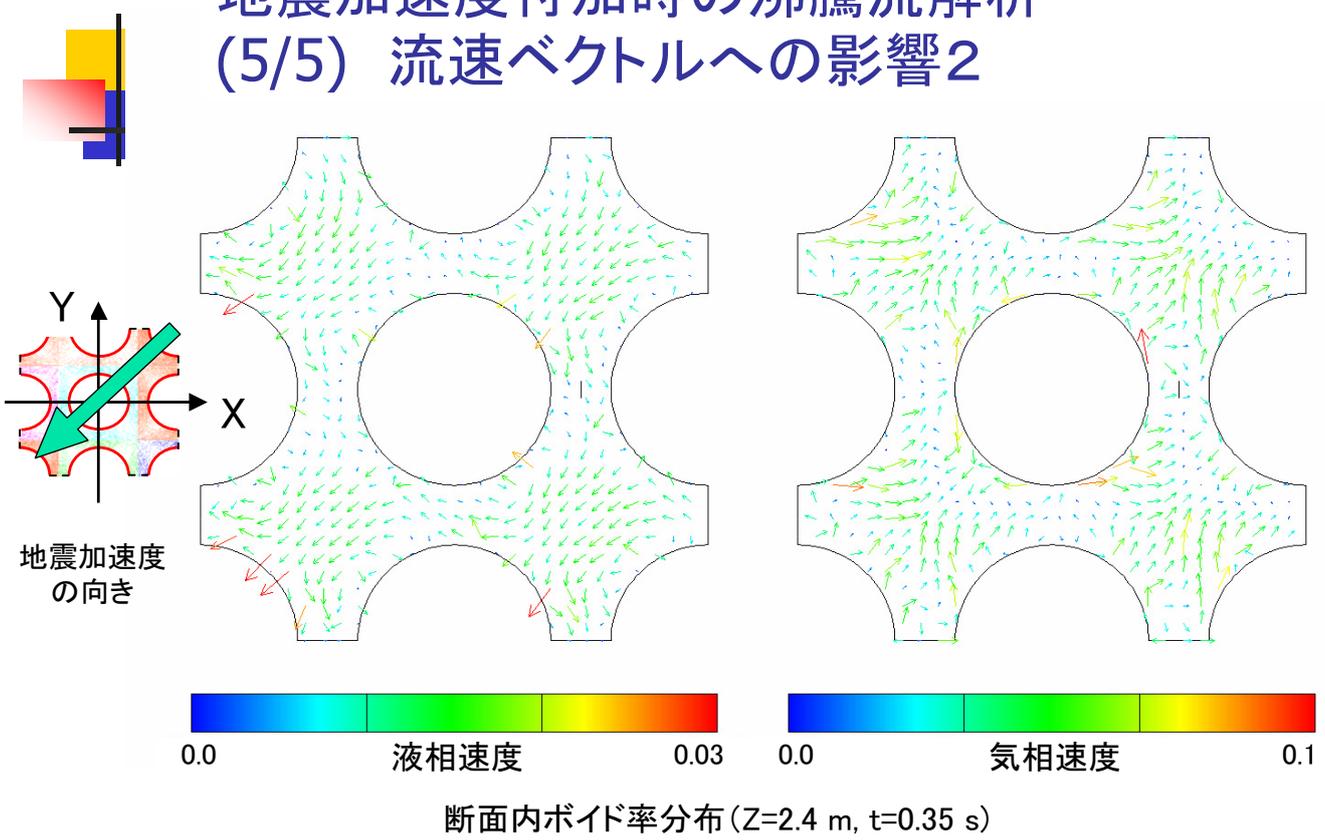


- 確認事項
- 地震加速度の影響でボイド率分布に差がみられる
 - ボイド率の変動には地震加速度周期に依存する傾向が見られる

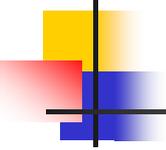
地震加速度付加時の沸騰流解析 (4/5) 流速ベクトルへの影響1



地震加速度付加時の沸騰流解析 (5/5) 流速ベクトルへの影響2

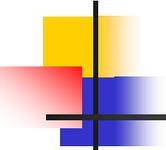


確認事項 ■液相の流速ベクトルは地震加速度と同じ向き、蒸気相は反対向き



平成21年度の研究成果のまとめ

1. 地震加速度や非定常境界条件を任意に設定できる機能を追加し、テスト計算を行って、付加した解析機能の妥当性を確認した。
2. 燃料集合体を簡略模擬した体系で、地震加速度を与えた条件で沸騰二相流解析が行えることを確認した。
3. 地震加速度が沸騰二相流に及ぼす影響因子について数値的に明らかにした。



今後の予定

1. 地震加速度が沸騰二相流に及ぼす影響因子の更なる検討
2. 機器構造解析及び核熱連成解析とデータを連携し、地震時における実炉を模擬した解析による総合評価

実炉を模擬した解析の詳細

- ・機器構造解析、核熱連成解析とのデータ連携により、熱流動解析を実施
- ・解析対象は、Peach Bottom2号炉7x7燃料集合体の2x2サブチャンネル

