

プールスクラビングにおける二相流CFD解析



安全研究センター 熱水力安全研究グループ

研究背景・目的

- プールスクラビングは、軽水炉の重大事故時に格納容器の過圧破損を避けるとともに、エアロゾル状放射性物質の閉じ込めに有効な対策の一つ
- Lamped Parameter (LP) コードのプールスクラビングモデルは、プールの気泡熱流動と除染係数を定義するエアロゾル粒子除去モデルによって構成される簡易モデル
 - 気泡熱流動は、気泡プルームを領域別に分け、それぞれ経験的相関に基づいたパラメータによって算出
- CFD解析（界面追跡/捕獲法）では、気泡プルーム全体を再現できるため、気泡の相互作用など気泡流体力学に関する詳細な情報や数値データが得られる
- 本研究では、プールスクラビングの気泡プルームのCFD解析の検証のために、以下を実施
 - ① VOF法およびS-CLSVOF法を適用したCFD解析
 - ② Abeら¹によって行われた実験データとの比較

¹ Abe, Y., et al., 2018. Bubble dynamics with aerosol during pool scrubbing. Nucl. Eng. Des. 337, 96-107.

実験・解析条件

- 対象流体** 水・空気（室温298 K & 大気圧）
- 気相流量** $Q = 8.5 \text{ L/min}$ ($\langle j_{g,0} \rangle = 5 \text{ m/s}$, $We = 2000$)
- 計算コード** OpenFOAM-2.2.x
- 二相流解析** VOF法、S-CLSVOF法
- 計算格子数** 1480万セル
- 計算時間** 表1のとおり

表1 計算時間

	VOF	S-CLSVOF
Physical time	10 s	10 s
CPU time	18 days on 96 processors	30 days on 96 processors
CPU	Intel Xeon E5-2680 v3 (2.5GHz)	Intel Xeon E5-2690 v3 (2.6GHz)

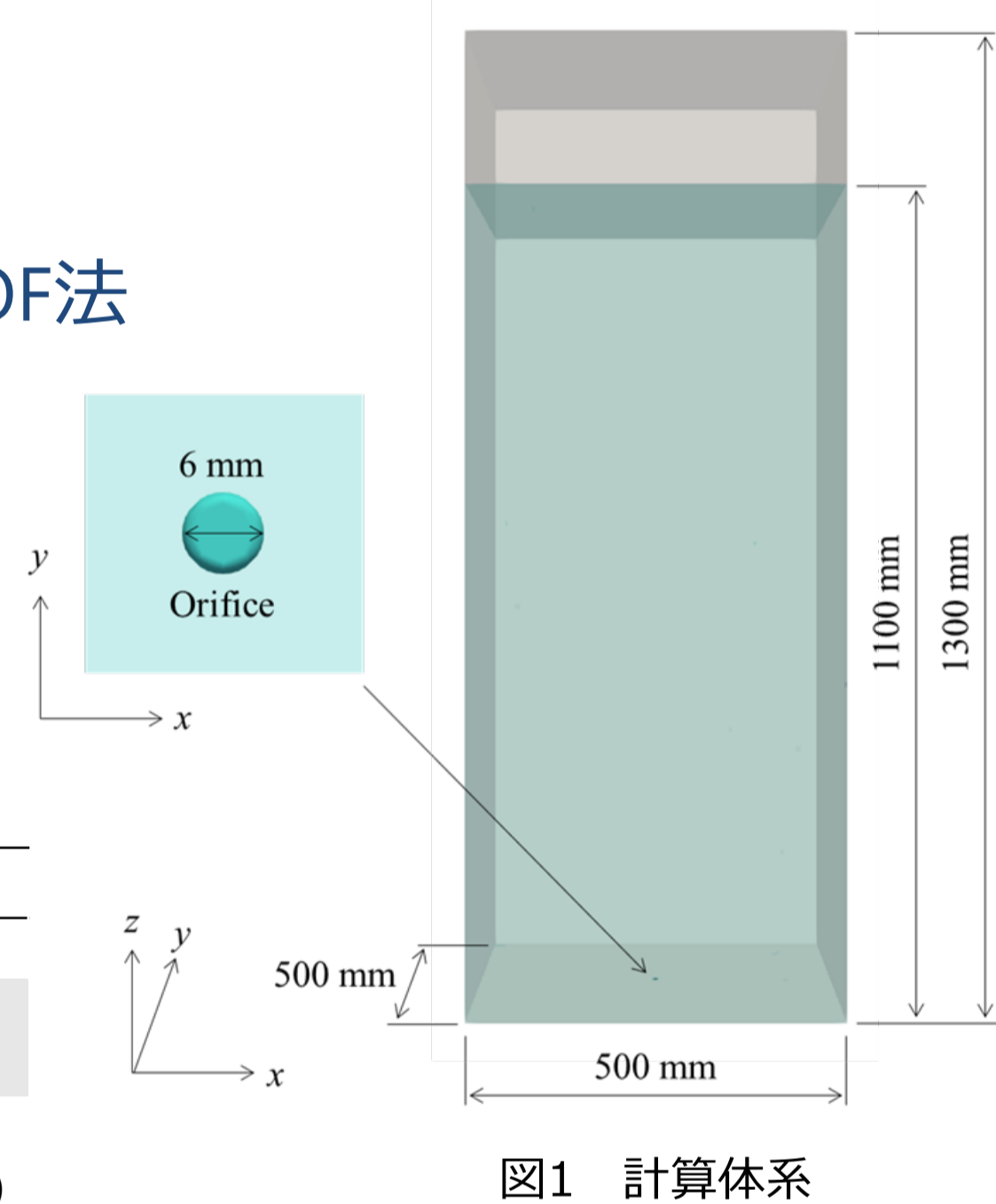
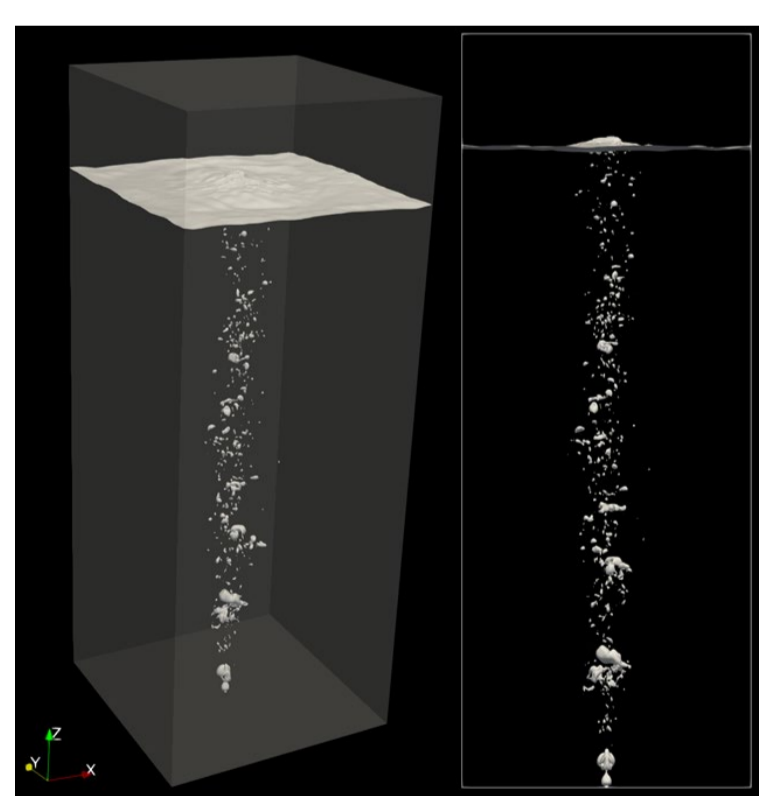
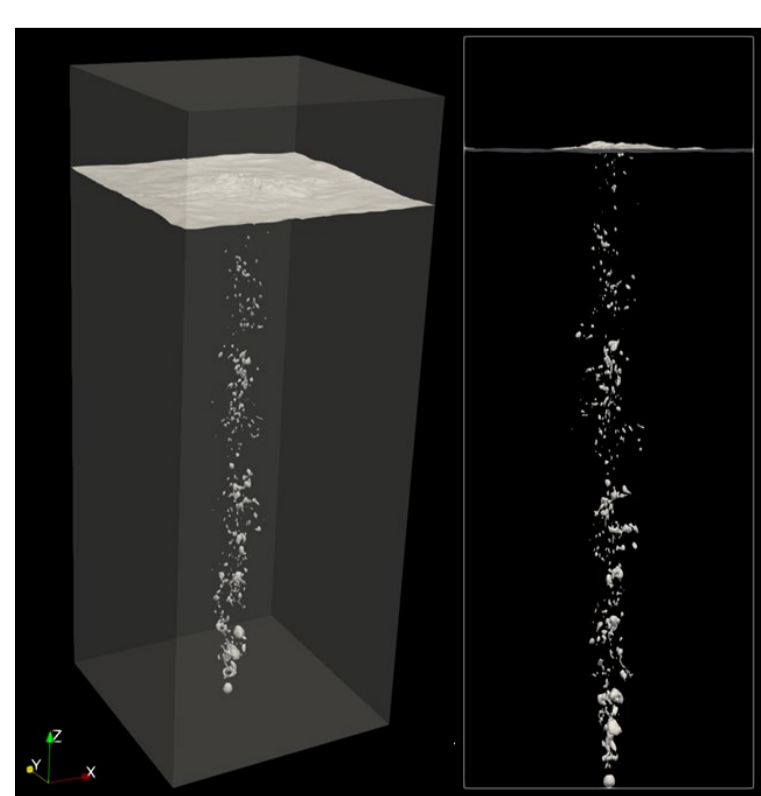


図1 計算体系

① VOF法およびS-CLSVOF法を適用したCFD解析

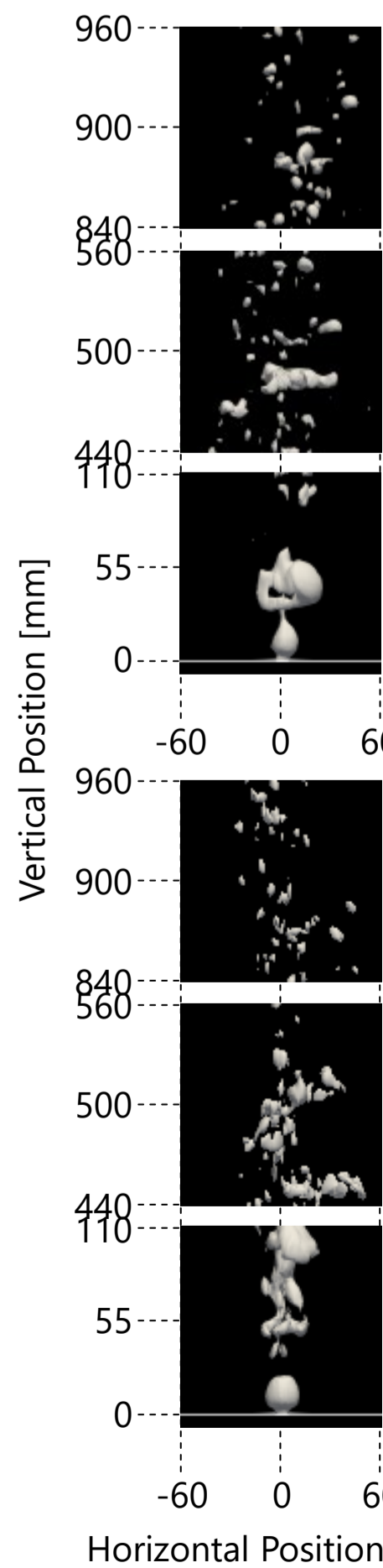


(a) VOF



(b) S-CLSVOF

図2 ボイド率等値面分布

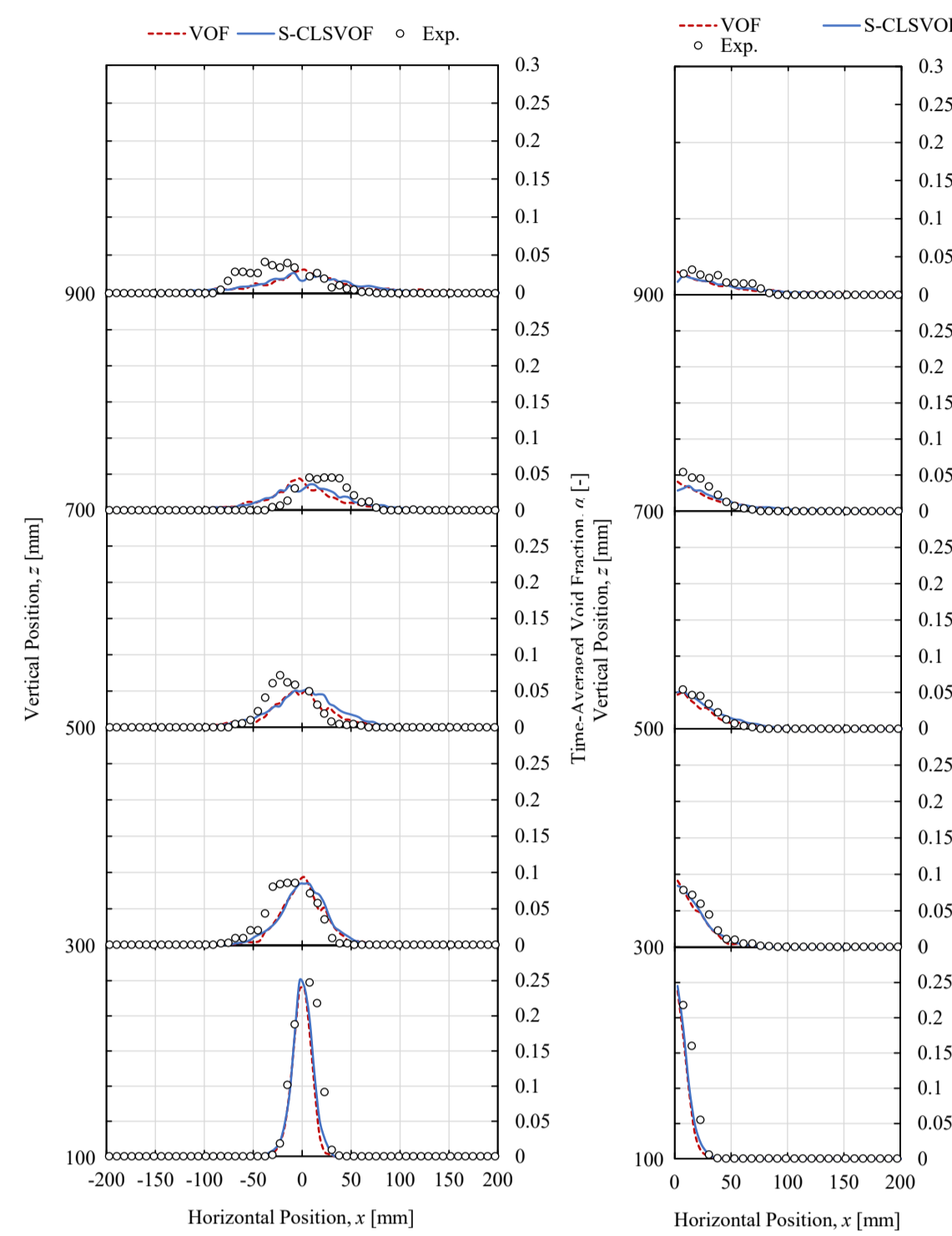


- ✓ オリフィスから注入された空気は、大気泡を形成後離脱
- ✓ 離脱した大気泡は上昇するにつれ、分裂や合体を繰り返し、気泡群（小気泡の集合）を形成
- ✓ S-CLSVOF法による平均離脱等価直径は、Oguzら²によって定義された近似値に近い結果を取得

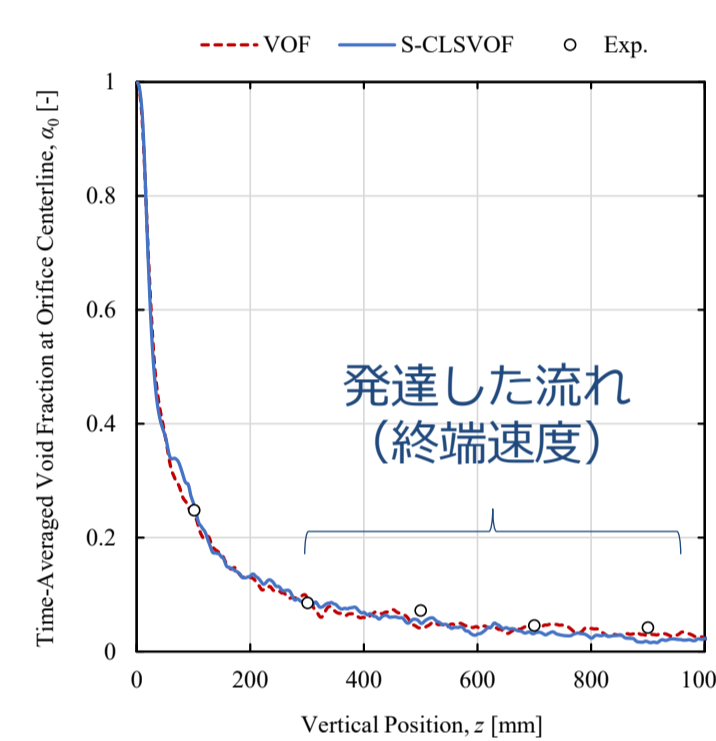
² Oguz, H.N., Prosperetti, A., 1993. Dynamics of bubble growth and detachment from a needle. J. Fluid Mech. 257, 111-145.

② 実験データとの比較

ボイド率（気相体積率）



(a) 水平方向



(b) 鉛直方向

図3 時間平均ボイド率分布

- ✓ S-CLSVOF法、VOF法共に実験結果と一致
- 十分な予測精度

気泡上昇速度

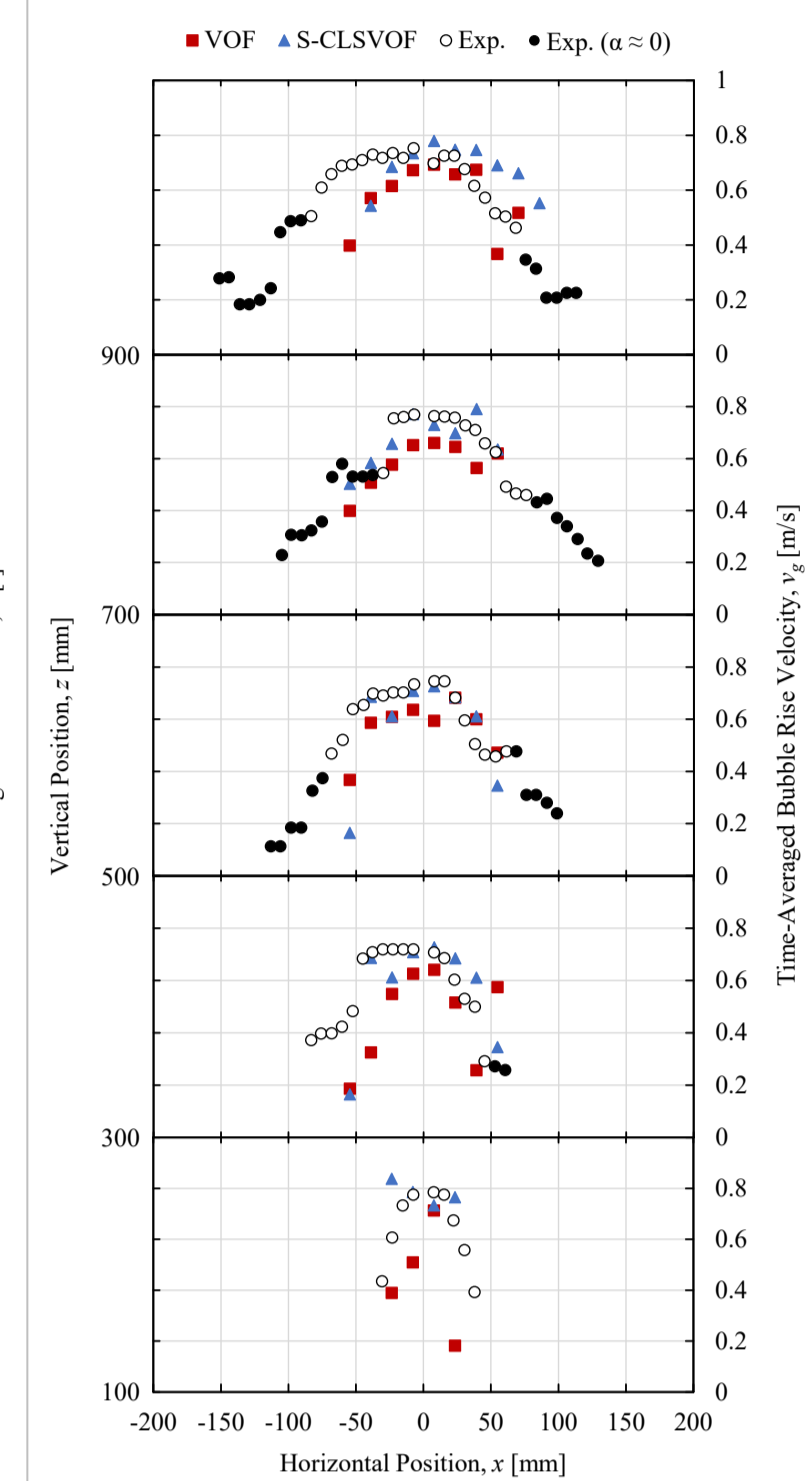


図4 時間平均気泡上昇速度分布（水平方向）

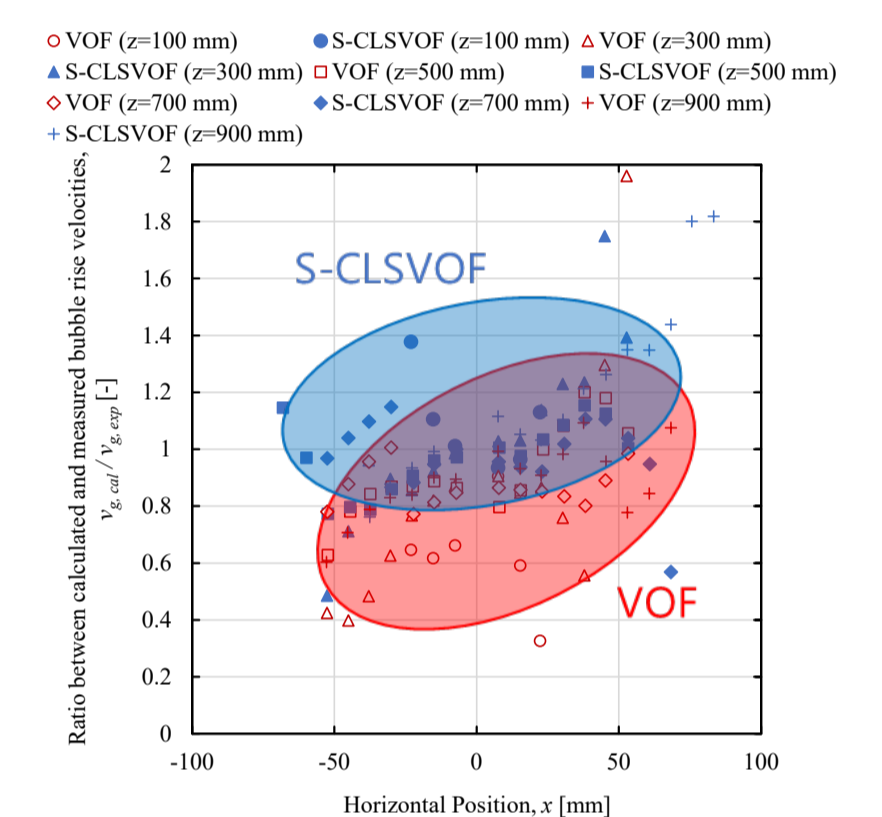


図5 計算と実験による気泡上昇速度の比の比較

- ✓ S-CLSVOF法は実験結果と一致、VOF法は実験結果を過小評価
- 気泡形状は気泡上昇速度に大きく影響

- ✓ 抵抗則では大気泡は0.5 m/s、小気泡は0.23 m/s
- チャネリング効果（循環流）の影響

気泡Sauter平均径

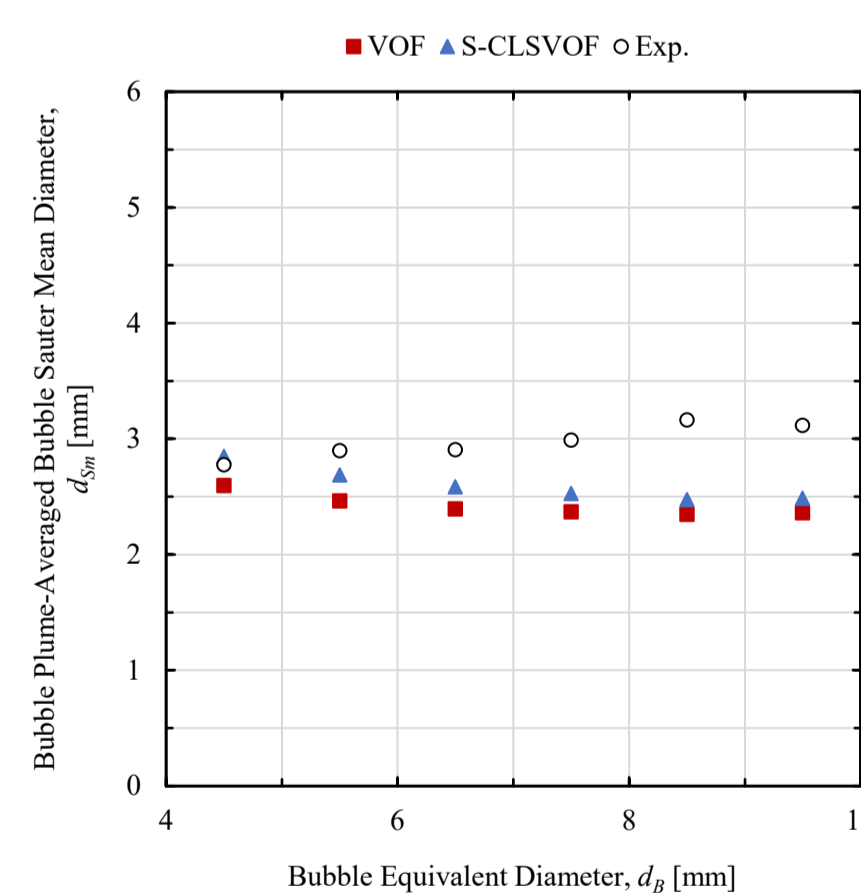


図6 気泡Sauter平均径

- ✓ 気泡Sauter平均径は緩やかに変化
 - 気泡体積増加率が気泡界面面積増加率と相殺されるため
- ✓ 実験による気泡Sauter平均径は増加するが、CFD解析による結果は減少
 - CFD解析では、界面の変形が強調され、CFD解析と実験結果の最大誤差は、ほぼ測定誤差の範囲内
- ✓ S-CLSVOF法の気泡Sauter平均径は、実験結果により近い

結論

- ✓ CFD解析により、気泡プルーム内の気泡挙動を予測
 - ✓ VOF法及びS-CLSVOF法によって得られた各高さのボイド率とオリフィスの中心線は、実験とよく一致し、流れの遷移を正確に予測
 - ✓ S-CLSVOF法は、気泡上昇速度を正確に予測し、気泡形状を正確に評価
 - ✓ CFD解析では、界面の変形が強調され、CFD解析と実験結果の気泡Sauter平均径の最大誤差は、ほぼ測定誤差の範囲内
- 今後は、原子力規制等で使用されているシビアアクシデントコードの検証や高度化に資するデータの提供を目指す