

## SIMMER の多成分多速度場におけるスロッシング挙動への適用性

### 1. 始めに

SIMMER コードを用いた「常陽」の評価事故シナリオ ULOF 及び UTOP の解析では、損傷した燃料とスチールからなる炉心物質の流動はそれぞれの物質成分毎に異なる速度場を与えている。これは燃料とスチールは炉心物質内で発生する FP ガスやスチール蒸気、局所的な FCI によって常に攪拌される一方で、密度差による重力分離が生じれば中性子吸収材としてのスチールが燃料と分離すること、及び燃料上部に形成されるスチール層による中性子反射効果が反応度に影響を持つと考えられるためである。

炉心物質の流動、とくに水平方向の揺動（スロッシング）は炉心物質の凝集による即発臨界超過挙動を支配する重要現象であり、炉内外試験の検証解析によって SIMMER コードの妥当性の確認が行われている。これらの試験は模擬流体として、水、鉛ビスマス、熔融燃料を用いているが、相対速度を有する多成分の流体を用いた試験ではない。このため、密度差のある多成分の相対流動解析の妥当性を確認し、これらの単成分による流動挙動の妥当性と合わせて、燃料とスチールの二つの物質成分からなる炉心物質流動に SIMMER コードを適用することの妥当性を示すこととする。

### 2. 検証解析

#### 2. 1 検証課題 1

解析を実施した課題は、DOE/EPRI が実施した 2 速度場解析コードベンチマーク<sup>1)</sup>からとった Problem 2.4 “A gravity-driven inter-penetration and separation (one dimensional sedimentation : 1 次元沈降問題)” である。

#### (1)解析体系

解析体系を第 1 図<sup>2)</sup>に示す。解析は 1 次元体系として、深さ 1m の軽い液体の上に深さ 1m の重い液体を設定した初期状態から、時間経過とともに重い液体が沈降して軽い液体と入れ替わる挙動を解析する。それぞれの液体の密度、重力、相間抵抗係数は以下の通りである。

$$\rho_1 = 1.0 \text{ (heavy phase)}$$

$$\rho_2 = 0.999 \text{ (light phase)}$$

$$\text{Gravity: } 2(\rho_1 - \rho_2)/(\rho_1 + \rho_2)g = 1.0$$

$$\text{Friction: } F = C_f(\alpha_1\rho_1 + \alpha_2\rho_2)\alpha_1\alpha_2(u_2 - u_1)$$
$$C_f = 2.0$$

## (2)解析結果

ベンチマークに参加した他の解析コードの結果を第2図に、SIMMERの解析結果を第3図に示す。左上から右下の4つのプロット図で、2、4、6、VIII秒後の軽い液体の体積率の軸方向分布を示している。解析メッシュの分割数は20メッシュと80メッシュの2ケースを実施した。この解析課題には理論解が存在し、第2図の黒い菱形、あるいは第3図の凡例でASOLとしている点線が理論解である。

理論解との比較結果からSIMMERは比重の異なる2液体の重力による入れ替わりを適切に解析できていると言える。また、SIMMERは比較的MINCSコードに近い結果となっているが、少ないメッシュ数(20メッシュ)で解析した場合、MINCSコードでは数値拡散のために理論解における8秒後の体系中央部分の折れ曲がりが見失われているのに対して、SIMMERはこれを捉えることが出来ている。

## 2. 2 検証課題2

解析を実施した課題は、DOE/EPRIが実施した2速度場解析コードベンチマーク<sup>[1]</sup>からとったProblem 4.1 “A transient behavior of gravity-driven overturning motion of the two liquid components having different densities in a two-dimensional tilted geometry (two-dimensional sedimentation : 2次元沈降問題)”である。

### (1)解析体系

解析体系を第4図<sup>[2]</sup>に示す。解析は1次元体系として、幅1.5m、深さ2mで10°傾けられた矩形容器内の下部1mに軽い液体、上部1mに重い液体を設定し、時間経過とともに重い液体が沈降して軽い液体と入れ替わる挙動を解析する。それぞれの液体の密度、重力、相間抵抗係数は2.1の1次元沈降問題と同じである。

### (2)解析結果

SIMMERの解析結果を第5図に示す。2秒、および4秒後の軽い液体の体積率分布の等高線図(0.2, 0.5, 0.8)を示している。この解析課題には理論解が存在せず、また傾けた体系を解析する難しさから、他のコードとしてはPHOENICS-VLコードによる解析結果のみが示されている。この結果を第6図に示す。理論解が存在しないために、SIMMERコードの妥当性の定量的な評価は困難であるが、PHENICS-VLコードの解析結果と同様の物質分布の時間変化を解析していることから、SIMMER及びPHOENICS-VLの両解析コードは定性的には密度の異なる2液体の重力による2次元的な入れ替わり挙動を適切に解析できていると考えられる。

## 2. 3 検証課題3

解析を実施した課題は、Snabre による粒径の異なる粒子が混合した状態からの分離沈降実験<sup>[3]</sup>である。この試験では、粒子径の異なる (25 $\mu\text{m}$  と 190 $\mu\text{m}$ ) ポリメチルメタクリレート(PMMA) 粒子を水中に懸濁させてその沈降挙動を測定した。2種類の粒子は粒径の違いから水との抵抗係数が異なり、大きな粒子は小さな粒子よりも早く沈降する。従って、この試験では水、小粒子、大粒子がそれぞれ異なる速度で流動することになり、3速度場の流動解析機能の検証に適している。なお、試験では2種類の粒子は異なる蛍光染料で染色され、異なる波長のレーザーで照射することでそれぞれの空間分布が独立に可視化されている。

#### (1)解析体系

試験装置は幅 4cm、奥行き 2cm、高さ 12cm の矩形容器でその内部に2種の粒子を均一に分散させた初期状態から粒子が沈降する。解析ではこれを 52 メッシュの1次元体系でモデル化した。

#### (2)解析結果

試験を開始して 806 秒後における試験結果と解析結果を比較した図を第7図<sup>[4]</sup>に示す。解析結果の白丸が小粒子、黒丸が大粒子の体積率分布である。試験結果では「b」が小粒子の分布、「b'」が大粒子の分布をそれぞれ異なる波長のレーザーで照射して撮影した結果である。SIMMER コードはそれぞれの粒子の空間分布を適切に再現しており、3速度場の流れの解析機能の妥当性を確認できたと考えられる。

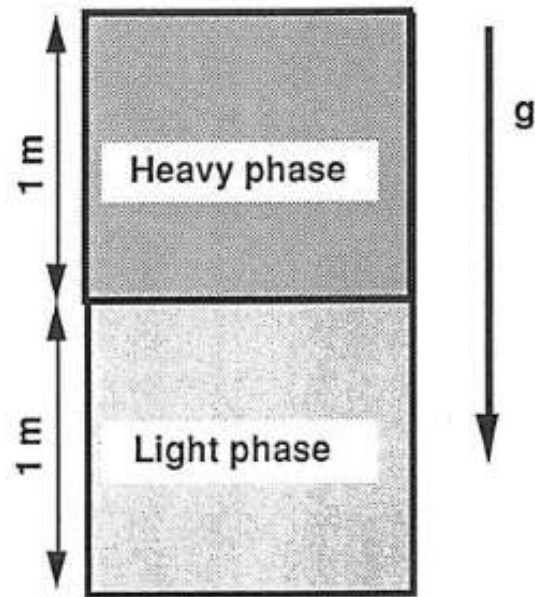
### 3. 考察とまとめ

密度の異なる液体が混在して相対的に流動する体系への SIMMER の適用性を確認した3つの検証解析例を示した。いずれの検証解析においても SIMMER は理論解、他のコードの比較、試験結果との比較において適切な結果を与えており、SIMMER は多速度場の液体の流動を適切に解析できることを確認した。これまでに実施した炉内外試験の検証解析による炉心物質のスロッシング挙動を解析する妥当性の確認に加えて、今回の多速度場の流動機能の妥当性を確認したことにより、SIMMER は密度の異なる燃料とスチールが混在した炉心物質の揺動挙動を適切に解析できると考えられる。

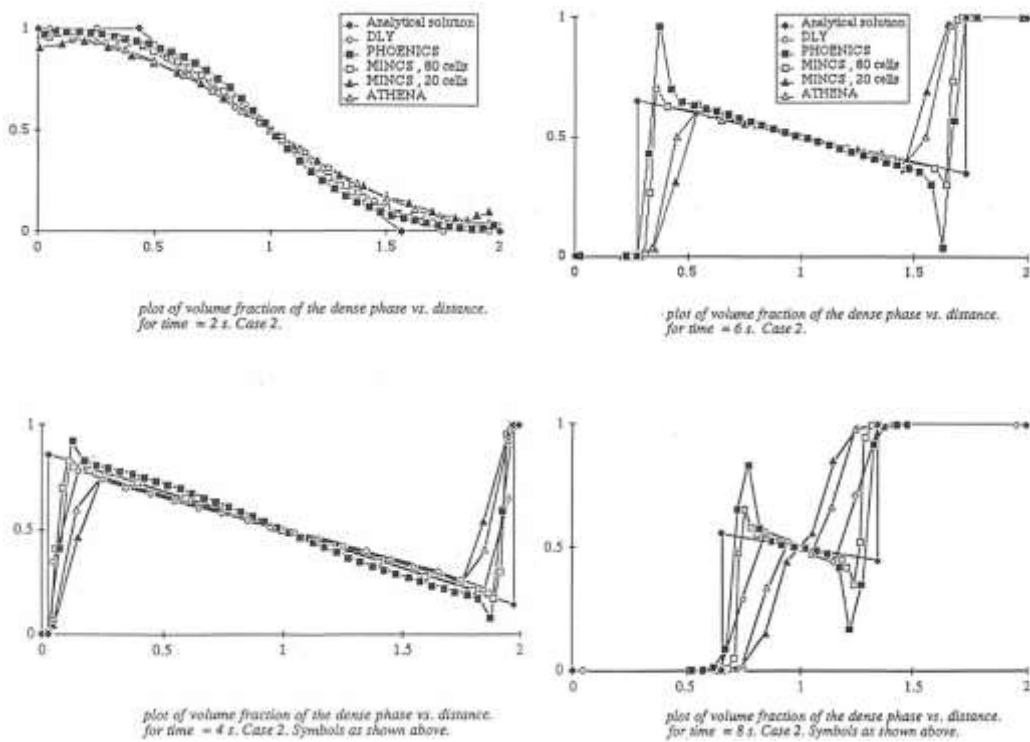
また、即発臨界超過直前の温度状態では燃料とスチールの密度比は約 10:7 程度で、燃料のほとんどは固化した燃料粒子あるいは未溶融の燃料ペレットからなり、その粒子径は燃料ペレットの粒径以下の数 mm 以下程度でスチールと緊密に混合している。このことから、即発臨界超過を駆動するような数秒間の時間における流動では、密度差の違いによる燃料とスチールの相対運動は顕著なものとはならず、むしろ燃料とスチールは一体化して流動し、これまでの炉内外試験の検証解析による炉心物質のスロッシング挙動の妥当性確認の成果をそのまま適用することができるものと考えられる。

#### 参考文献

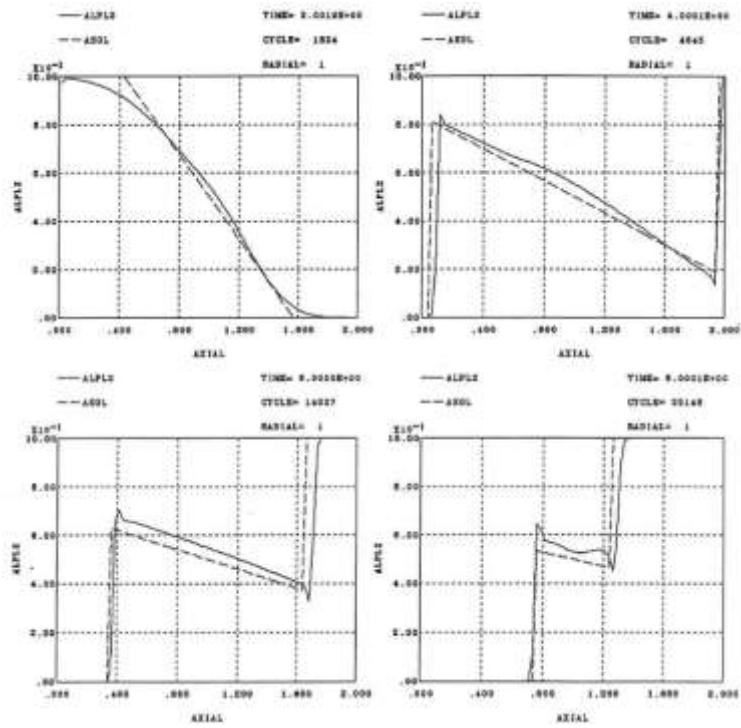
- [1] D. P. Spolding et al., “Problem specification and collated solutions of the two-phase flow numerical- benchmark experience 1986-7”, DOE/EPRI Second Int. Workshop on Two-Phase Flow Fundamentals, Troy, New York, 16-20 March, 1987.
- [2] Phase 1 code assessment of SIMMER-III, A computer program for LMFR core disruptive accident analysis, JAEA-Research 2019-009.
- [3] P. Snabre, et al., “Size segregation and particle velocity fluctuations in settling concentrated suspensions”, *Rheol. Acta*, Vol.48, pp.855-870, 2009.
- [4] Y. Tobita, et al., “Development of the evaluation methodology for the material relocation behavior in the core disruptive accident of sodium-cooled fast reactors”, *J. Nucl. Sci. and Tech.*, Vol.53, No.5, pp.698-706, 2016.



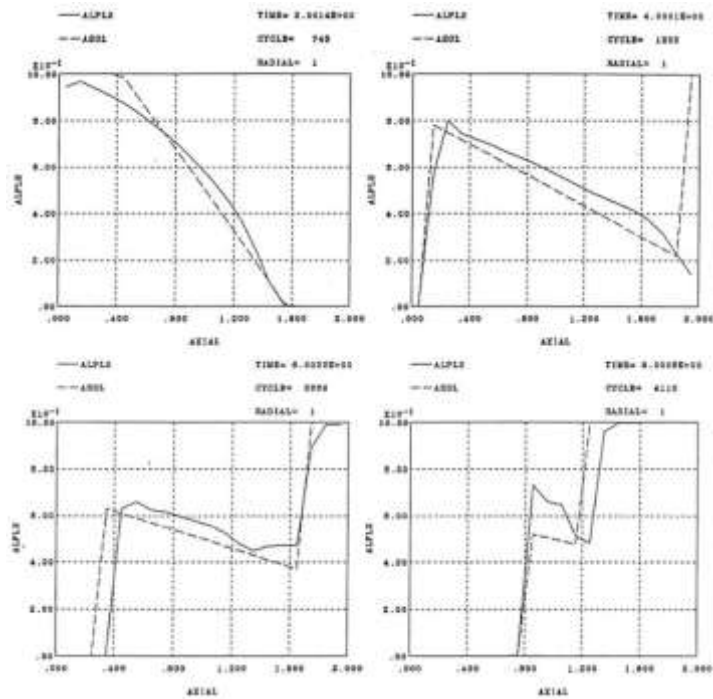
第1図 1次元沈降問題解析体系<sup>[2]</sup>



第2図 1次元沈降問題 他のコードによる解析結果<sup>[2]</sup>

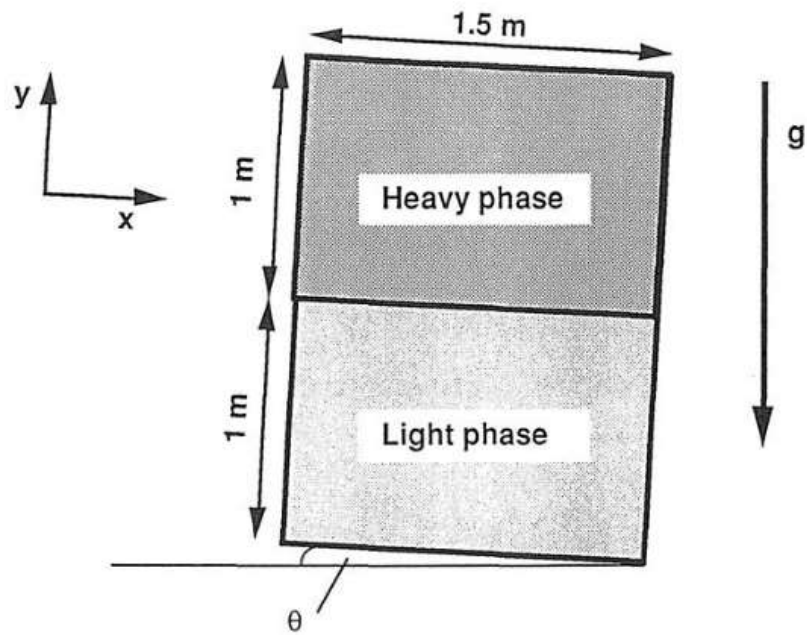


(a) 80 メッシュ解析結果

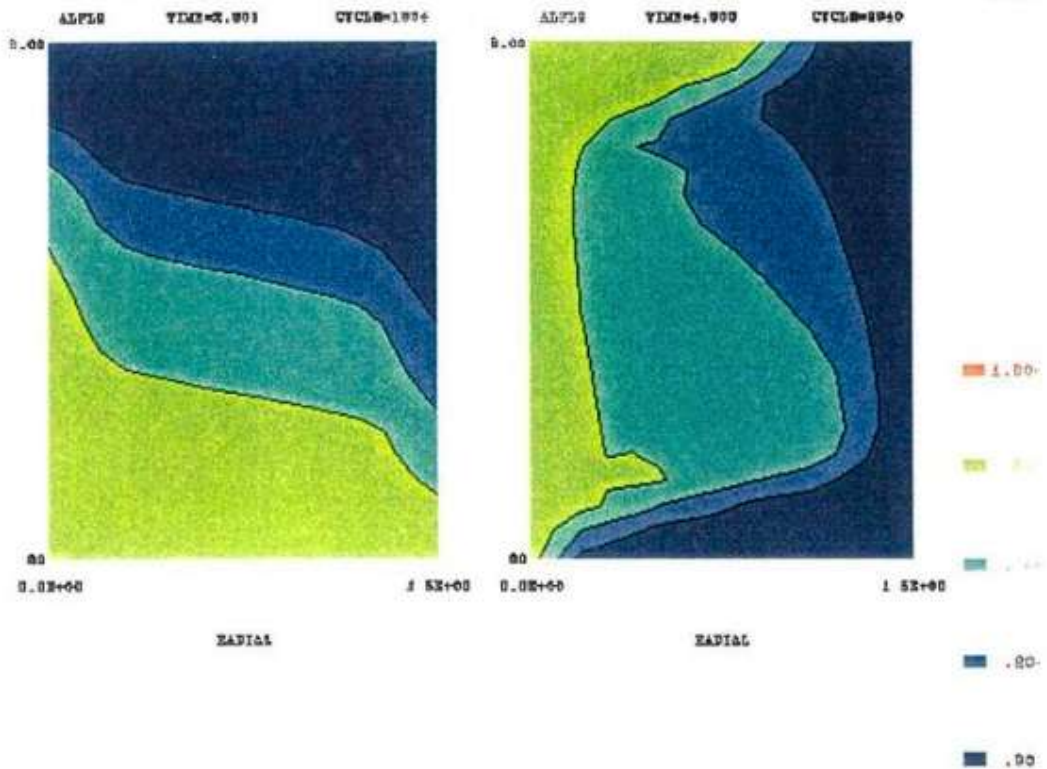


(b) 20 メッシュ解析結果

第3図 1次元沈降問題 SIMMER による解析結果<sup>[2]</sup>

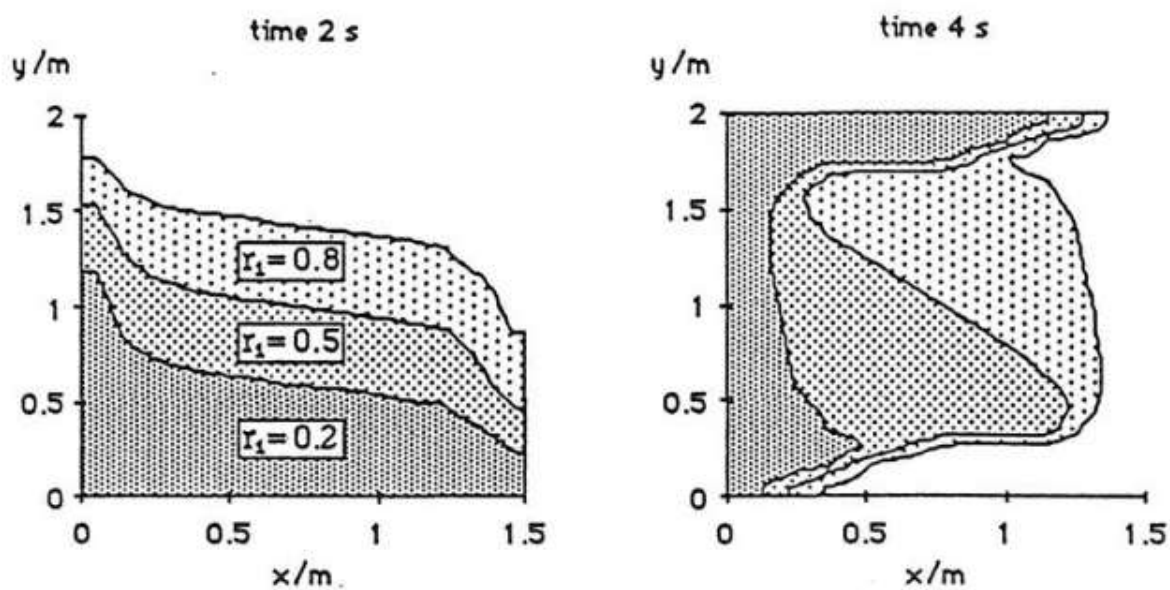


第4図 2次元沈降問題解析体系<sup>[2]</sup>



第5図 2次元沈降問題 SIMMERによる解析結果<sup>[2]</sup>

取扱注意



第6図 2次元沈降問題 PHOENIX-VLによる解析結果<sup>[2]</sup>

著作権の関係から公開できません。

第7図 Snabre<sup>[3]</sup>らによる粒子沈殿試験の解析結果と試験結果の比較<sup>[4]</sup>