

平成 30 年度

文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業  
英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

**Multi-physics モデリングによる Ex-Vessel  
溶融物挙動理解の深化**

**成果報告書**

平成 31 年 3 月  
学校法人 早稲田大学

本報告書は、文部科学省の英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業による委託業務として、学校法人 早稲田大学が実施した平成 28-30 年度「Multi-physics モデリングによる Ex-Vessel 溶融物挙動理解の深化」の成果を取りまとめたものです。

## 目次

表一覧	ii
図一覧	iii
略語一覧	vii
概略	viii
1. はじめに	1
2. 業務計画	3
2.1. 全体計画	3
2.2. 各年度計画	5
2.2.1. 平成 28 年度の成果の目標及び業務の実施方法	5
2.2.2. 平成 29 年度の成果の目標及び業務の実施方法	6
2.2.3. 平成 30 年度の成果の目標及び業務の実施方法	7
3. 業務の実施内容及び成果	9
3.1. MPS 法による Ex-Vessel 溶融物挙動の理解の深化	9
3.1.1. MPS 法による spreading 解析モデルの検討と理解の深化	9
3.1.2. MPS 法による MCCI 解析モデルの検討と理解の深化	20
3.1.3. 数学による離散化手法の検討	27
3.1.4. MPS 法によるデブリ流下・集中挙動の計算機実験	38
3.1.5. 新しい高温融体粘性評価手法検討のための解析	52
3.1.6. まとめ	53
3.2. 模擬デブリ流下実験による MPS 解析結果の妥当性の検証（再委託先：電力中央研究所）	55
3.2.1. 平成 28 年度の実施内容及び成果	55
3.2.2. 平成 29 年度の実施内容及び成果	59
3.2.3. 平成 30 年度の実施内容及び成果	70
3.2.4. まとめ	89
3.3. UO <sub>2</sub> 流下実験による基礎データ取得（再委託先：大阪大学）	90
3.3.1. 平成 28 年度の実施内容及び成果	90
3.3.2. 平成 29 年度の実施内容及び成果	93
3.3.3. 平成 30 年度の実施内容及び成果	102
3.3.4. まとめ	107
3.4. 研究推進	108
4. 結言	110
4.1. MPS 法による Ex-Vessel 溶融物挙動の理解の深化	110
4.2. 模擬デブリ流下実験による MPS 解析結果の妥当性の検証（再委託先：電力中央研究所）	112
4.3. UO <sub>2</sub> 流下実験による基礎データ取得（再委託先：大阪大学）	113
4.4. 今後の展望	113
参考文献	115

## 表一覧

表 2.1-1 : 年度別全体計画 .....	4
表 3.1-1 : Spreading 実験マトリックス (実験概要) .....	9
表 3.1-2 : Spreading 実験マトリックス (測定データ) .....	10
表 3.1-3 : VULCANO VE-U7 実験の解析条件 [11] .....	13
表 3.1-4 : FARO L-26S 実験に用いられた溶融物 .....	19
表 3.1-5 : 初期の MCCI 実験の概要 .....	21
表 3.1-6 : 近年の主な MCCI 実験 .....	22
表 3.1-7 : VULCANO VB-U7 実験の解析に用いる物性値 [35] .....	24
表 3.1-8 : 平板 spreading 実験及び解析条件 .....	39
表 3.1-9 : MPS 法によるデブリ流下・集中挙動の計算機実験の条件 .....	39
表 3.1-10 : 模擬デブリ流下実験の実験条件表 .....	41
表 3.1-11 : 解析に用いたシリコン油の物性値 .....	44
表 3.1-12 : 解析に用いたパラフィンの物性値 .....	44
表 3.1-13 : アブレーションを伴う模擬デブリ流下実験の条件表 .....	49
表 3.1-14 : 液滴振動計算に用いた物性 .....	52
表 3.1-15 : 液滴振動解析の物性入力値と結果から算出した物性値の比較 .....	53
表 3.2-1 : 等温実験の実験パラメータ表 .....	55
表 3.2-2 : 計測器の仕様 .....	56
表 3.2-3 : 模擬デブリ流下等温実験の実験パラメータ .....	60
表 3.2-4 : 模擬デブリ流下実験の計測項目 .....	61
表 3.2-5 : 模擬デブリ流下実験のケース名称と実験パラメータの関係 .....	64
表 3.2-6 : 模擬デブリ流下実験の実験条件表 .....	65
表 3.2-7 : アブレーションを伴う模擬デブリ流下実験の実験パラメータ .....	74
表 3.2-8 : アブレーションを伴う模擬デブリ流下実験の計測項目 .....	75
表 3.2-9 : アブレーションを伴う模擬デブリ流下実験の実験条件表 .....	77
表 3.2-10 : ペDESTAL 模型を溶液に沈めたときの液位の変化量 .....	78
表 3.2-11 : アブレーション体積 (液面高さを変換) .....	79
表 3.3-1 : 試料の仕込み組成と組成分析結果 .....	93

図一覧

図 3.1-1 : クラストモデルの概念	11
図 3.1-2 : クラストモデルを導入した MPS 法の試解析結果	11
図 3.1-3 : MPS 法クラストモデルの有無による Spreading の違い	12
図 3.1-4 : Spreading 流動先端距離の時間進展 (既存 MPS 法、粒子径の影響)	13
図 3.1-5 : Spreading 流動先端距離の時間進展 (改良 MPS 法)	14
図 3.1-6 : 二次元タンクからの液体流出ベンチマーク (従来アルゴリズム)	16
図 3.1-7 : 従来 MPS 法のアルゴリズムとその改良案	16
図 3.1-8 : 二次元タンクからの液体流出ベンチマーク (新アルゴリズム)	17
図 3.1-9 : MPS 法による FARO L-26S 実験の二次元解析体系	19
図 3.1-10 : MPS 法による FARO L-26S 実験の解析結果例	19
図 3.1-11 : VULCANO VB-U7 実験の MPS 法の解析体系とモデル	23
図 3.1-12 : 粗骨材非均質モデルの有無によるコンクリート等方浸食・非等方浸食の試解析結果	24
図 3.1-13 : VULCANO VB-U7 実験のコンクリート浸食深さの比較	25
図 3.1-14 : VULCANO VB-U7 実験のコンクリート浸食後の最終断面形状の比較	26
図 3.1-15 : 改良 MPS 法による解析結果 (温度分布)	26
図 3.1-16 : 周期渦列の崩壊過程のベンチマークのz方向渦度の初期分布 (メッシュ法)	29
図 3.1-17 : 周期渦列の崩壊過程のベンチマークの初期速度ベクトル図 (メッシュ法)	30
図 3.1-18 : 周期渦列の崩壊過程のベンチマークのz方向渦度の分布 (メッシュ法)	30
図 3.1-19 : エネルギー、ヘリシティ、エンストロフィの計算結果 (メッシュ法)	31
図 3.1-20 : 周期渦列の崩壊過程のベンチマークの初期速度分布 (MPS 法)	32
図 3.1-21 : 周期渦列の崩壊過程のベンチマークの初期速度ベクトル図 (MPS 法)	32
図 3.1-22 : 周期渦列の崩壊過程のベンチマークのz方向渦度の分布 (MPS 法)	32
図 3.1-23 : エネルギーとヘリシティの計算結果 (MPS 法)	33
図 3.1-24 : 平板 spreading 実験及び解析の体系と解析結果例 (粒子径 : 0.2 mm)	39
図 3.1-25 : 平板 spreading 実験と異なる粒子径の解析結果の比較 (ノズル高さ : 5 mm)	40
図 3.1-26 : 模擬デブリ流下実験の溶融物流下位置及び計測線 (1/100 スケール)	41
図 3.1-27 : 表面張力モデルが spreading に及ぼす影響の様子 (1/100 スケール体系、流下位置 S1、動粘度 5000mm <sup>2</sup> /s)	42
図 3.1-28 : 表面張力モデルが spreading に及ぼす定量的な影響 (1/100 スケール体系、流下位置 S1、動粘度 5000mm <sup>2</sup> /s)	42
図 3.1-29 : デブリ流下実験と MPS 解析結果の比較 (1/100 スケール、流下位置 S1、粘性係数 5000mm <sup>2</sup> /s)	43
図 3.1-30 : 溶融物高さ分布の比較 (1/100 スケール、流下位置 S1、粘性係数 5000mm <sup>2</sup> /s)	43
図 3.1-31 : 模擬デブリ流下地点と模擬ペDESTALのアブレーション測定位置	45
図 3.1-32 : 実験結果と解析結果の様子の比較 (ケース名 : ケース名 : M5000V40T110S1)	45
図 3.1-33 : 実験と解析のアブレーション比較 (ケース名 : M5000V40T110S1 / 測線 6)	46

図 3.1-34 : スリップ境界層の概念図	47
図 3.1-35 : ノンスリップ境界とスリップ境界のモデルの比較	47
図 3.1-36 : 異なる境界モデルを用いたときのアブレーションと速度分布の比較	47
図 3.1-37 : 実験と解析 (対流促進モデル利用) のアブレーション比較 (ケース名 : M5000V40T110S1 / 測線 6)	49
図 3.1-38 : 実験結果と解析結果の比較 (ケース名 : M5000V40T110S1)	50
図 3.1-39 : 実験結果と解析結果のアブレーション分布の比較 (ケース名 : M5000V40T110C0)	50
図 3.1-40 : 実験結果と解析結果のアブレーション分布の比較 (ケース名 : M5000V40T140C0)	51
図 3.1-41 : 液滴振幅の解析結果	53
図 3.2-1 : 実験装置の構成	56
図 3.2-2 : 格納容器ペDESTALの構造	57
図 3.2-3 : ペDESTALの三次元 CAD 図	57
図 3.2-4 : 3D プリントで製作したペDESTAL模	57
図 3.2-5 : 流下位置の検討 (寸法は 1/100 の場合)	58
図 3.2-6 : 模擬デブリの流下位置の検討	60
図 3.2-7 : 模擬デブリ流下等温実験の実験装置概要	62
図 3.2-8 : シリンジポンプによるシリコン油流下詳細図	62
図 3.2-9 : 二次元レーザー変位計による計測部の概要	63
図 3.2-10 : 模擬デブリ流下実験の実験装置の外観写真	63
図 3.2-11 : 模擬デブリ流下実験の溶融物流下位置と名称	65
図 3.2-12 : 模擬デブリ流下実験の流動観察結果 (1/100 スケール、流下位置 S1、粘性係数 5000mm <sup>2</sup> /s)	67
図 3.2-13 : 模擬デブリ流下実験の溶融物断面形状の時間進展 (1/100 スケール、流下位置 S1、粘性係数 5000mm <sup>2</sup> /s)	68
図 3.2-14 : 模擬デブリ流下実験の溶融物高さ分布の時間変化 (1/100 スケール、流下位置 S1、粘性係数 5000mm <sup>2</sup> /s)	68
図 3.2-15 : 模擬デブリ流下実験の溶融物流出重量の時間変化 (1/100 スケール、流下位置 S1、粘性係数 5000mm <sup>2</sup> /s)	69
図 3.2-16 : シリコン油によるパラフィン板のアブレーション確認 (実験装置概要)	71
図 3.2-17 : 坩堝内シリコン油の流下方法	71
図 3.2-18 : シリコン油の流量曲線の確認 (実験装置概要)	72
図 3.2-19 : シリコン油の流量曲線 (坩堝チャージ量 20g)	73
図 3.2-20 : シリコン油の流量曲線 (坩堝チャージ量 280g)	73
図 3.2-21 : シリコン油の流下位置 (アブレーション有り)	74
図 3.2-22 : アブレーションを伴う模擬デブリ流下実験装置の概要 (上面図)	76
図 3.2-23 : レーザー測定結果と理論式から算出される結果の比較	79

図 3.2-24 : アブレーションを伴う模擬デブリ流下実験の流動観察結果 (ケース名 : M5000V40T110C0) .....	80
図 3.2-25 : サンプピット及び搬出口への流出量 (流下重量の時間変化) .....	81
図 3.2-26 : 溶融物温度の影響 (流下重量の時間変化) .....	81
図 3.2-27 : アブレーション形状の測定 (2次元×6断面) .....	83
図 3.2-28 : 流下後のペDESTAL模型表面形状 (ケース名 : M5000V40T110C0) .....	83
図 3.2-29 : 流動観察結果 (ケース No. 1 : M5000V40T110C0) .....	84
図 3.2-30 : 流動観察結果 (ケース No. 6 : M5000V40T140C0) .....	85
図 3.2-31 : ペDESTAL模型表面形状の流下流量による比較 (初期温度 110°C, 流下位置 S2) .....	86
図 3.2-32 : ペDESTAL模型表面形状の流下流量による比較 (初期温度 110°C, 流下位置 S2) .....	87
図 3.2-33 : ペDESTAL模型表面形状の流下位置による比較 (流下流量 40 g/min, 初期温度 140°C) .....	88
図 3.3-1 : 液滴衝突実験装置の概要 .....	90
図 3.3-2 : 作製した液滴衝突実験装置と試料溶融時の観察例 .....	91
図 3.3-3 : 放射温度計によって測定した試料温度 .....	92
図 3.3-4 : ①ハンマー及び②分割式コニカルノズルを用いて行った Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 液滴衝突実験の様子 .....	92
図 3.3-5 : ガス浮遊溶融装置によって溶融させた Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 試料の外観 .....	93
図 3.3-6 : 液滴衝突実験装置の概要 (分割式コニカルノズル) .....	94
図 3.3-7 : Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 液滴衝突実験の様子 (温度は衝突時の推定温度) .....	95
図 3.3-8 : Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> 液滴衝突実験の様子 (温度は衝突時の推定温度) .....	95
図 3.3-9 : 物性測定装置の概要 .....	97
図 3.3-10 : 物性測定用装置 .....	97
図 3.3-11 : 画素数と長さの関係 .....	98
図 3.3-12 : 振動中の試料 (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) .....	98
図 3.3-13 : 水平方向の試料径の時間変化とフィッティング結果 (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) .....	98
図 3.3-14 : Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 融体の密度測定結果 .....	99
図 3.3-15 : Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 融体の粘性測定結果 .....	99
図 3.3-16 : 変形後試料の断面の模型 .....	101
図 3.3-17 : 3091 K の Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 液滴試料の解析例 .....	101
図 3.3-18 : Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> の表面張力の測定結果 .....	101
図 3.3-19 : 作製した (U <sub>1-x</sub> Zr <sub>x</sub> )O <sub>2</sub> 試料の写真 .....	102
図 3.3-20 : ZrO <sub>2</sub> 液滴を Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ZrO <sub>2</sub> , BN 基板へ衝突させた際の挙動 .....	103
図 3.3-21 : (Zr <sub>0.9</sub> U <sub>0.1</sub> )O <sub>2</sub> 液滴を BN 基板に落下させた様子 .....	104
図 3.3-22 : 減衰振動をする溶融 ZrO <sub>2</sub> の水平方向の試料径の時間変化とフィッティング結果 .....	104
図 3.3-23 : 溶融 ZrO <sub>2</sub> の (a) 密度、(b) 粘性の温度依存性 .....	105

図 3.3-24 : 衝突後に反跳して振動している  $\text{Al}_2\text{O}_3$  液滴の様子 ..... 106

## 略語 一 覧

- ADL : Aerodynamic Levitation (ガス浮遊法 : ガス流の圧力と容器の圧力差を利用して一定の位置に浮遊させる方法)
- CAD : Computer-aided design (キャド : コンピュータを用いて設計をすること、あるいはコンピュータによる設計支援ツールのこと)
- CEA : Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (仏国の原子力・代替エネルギー庁)
- BWR : Boiling Water Reactor (沸騰水型原子炉 : 軽水を原子炉冷却材及び中性子減速材とし、この軽水を炉心で沸騰させて蒸気を発生させ直接タービン発電機に導き電気を得る発電用原子炉)。
- HMPS : Hamiltonian Moving Particle Semi-implicit Method (HMPS 法 : Hamilton 力学的定式化による MPS 法)
- MCCI : Molten Corium Concrete Interaction (コア・コンクリート反応 : 原子炉過酷事故時に格納容器床に放出される溶融炉心と床コンクリートの相互作用やそれに伴うコンクリートの熱分解や浸食)
- MD : Molecular Dynamics (分子動力学法 : 原子ならびに分子の物理的な動きのコンピュータシミュレーション手法)
- MPS : Moving Particle Semi-implicit Method (MPS 法 : 粒子法の一つであり非圧縮性流れの解析手法の一つ。)
- PCV : Primary Containment Vessel (原子炉格納容器 : 原子炉とその冷却系設備などを収容する建造物)
- PWR : Pressurized Water Reactor (加圧水型原子炉 : 軽水を原子炉冷却材及び中性子減速材とし、この軽水を炉心ではバルク沸騰させず、蒸気発生器により発生する蒸気をタービン発電機に導き電気を得る発電用原子炉)
- RPV : Reactor Pressure Vessel (原子炉圧力容器 : 原子炉の炉心部を収納する鋼製容器)
- SA : Severe Accident (原子炉過酷事故 : 原子力発電所などの原子炉施設において、設計時に考慮した範囲を超える異常な事態が発生し、想定していた手段では適切に炉心を冷却・制御できない状態になり、炉心溶融や原子炉格納容器の破損に至る事象)

## 概略

### 研究の背景

従来の原子炉過酷事故 (SA) 解析手法では原子炉格納容器 (PCV) 床面に放出された、原子炉容器外 (Ex-Vessel) 溶融物挙動の基本的な現象を支配する伝熱・流動・相変化のモデルに経験式が多用されているため、これらを含む重要な影響因子の複雑な相互作用を正確にモデル化できない。すなわち、固定された計算メッシュやグリッドで流体の運動を離散化する従来のオイラー法では、運動に伴う流体の自由界面の変化を正確に求めることが困難であり、伝熱・流動・相変化を伴う溶融物の広がり挙動 (spreading) の解析で重要な自由界面の正確な追跡が困難である。同様に、溶融物とコンクリートの相互作用 (MCCI) における溶融物とコンクリートの界面での熱流束や、コンクリートのアブレーション (浸食) に伴う自由界面の変化を近似的に求める必要がある。

Moving Particle Semi-implicit (MPS) 法は、流体の運動に合わせて計算点 (粒子) が運動するラグランジュ法に基づく粒子法の一つであり、非圧縮性流体の Navier-Stokes 運動方程式 (NS 運動方程式) を粒子間相互作用モデルと重み関数によって離散化する手法である。このため、自由界面は粒子の運動で正確に求めることができ、経験式や近似式が不要であり、オイラー法の解析で問題となる界面での数値拡散も生じない。又、伝熱・流動を支配する微分方程式に含まれる微分演算子は MPS 法の粒子間相互作用モデルと重み関数で離散化でき、オイラー法の解析で必要となるような対流項を解く必要がない。

### 本研究の目的

本研究は、原子炉過酷事故時の Ex-Vessel 溶融物の spreading やそれによるアブレーション現象を伴う、溶融物の流下・集中挙動を対象に研究する。MPS 法による計算機実験、模擬デブリ流下実験、UO<sub>2</sub> 流下実験による基礎データ取得により、Ex-Vessel 溶融物挙動の理解を深めることを目的とする。

### 本研究の実施内容・成果

#### (1) MPS 法による Ex-Vessel 溶融物挙動の理解の深化

##### ① MPS 法による Spreading 解析モデルの検討と理解の深化

過去の Ex-Vessel 溶融物 spreading 挙動解析の検証に用いられた実験マトリックスを精査し、VULCANO VE-U7 実験を MPS 法による spreading 解析の検証対象に選定し、MPS 法の三次元 spreading 解析を実施した。Spreading 全般を支配すると考えられる因子と spreading の停止を支配すると考えられる因子がどのように spreading に影響するのかを定量的に明らかにするため、MPS 法に新たなクラスト形成モデルを組み込んだ。

新たな MPS 法による VULCANO VE-U7 実験の解析結果と実験データを分析し、同実験の spreading は、流動初期には重力/粘性支配の流動であるが、流動先端に形成されるクラストと流動の固液相互作用の結果、クラストが次第に発達し、やがてバルク流動をせき止めて最終的に流動停止に至る機構が考えられることが示された。解析結果は実験データや過去の研究と良く整合しており、新たな MPS 法の spreading 解析手法の妥当性が示された。

更に、当初は想定していなかった新たな MPS 法のアルゴリズムを考案し、クラストの再溶融だけでなく、実機事故条件で想定されるクラストの機械的な破断のモデル化に成功した。この新モデルを MPS 法に組み込み、FARO L-26S 実験で観測された、クラスト形成による流動の一時停止と、

クラスト破断による再流動を機構論的に示すことに世界で初めて成功し、当初の想定を超える成果が得られた。

## ② MPS 法による MCCI 解析モデルの検討と理解の深化

過去の MCCI 解析の検証に用いられた実験マトリックスを精査し、VULCANO VB-U7 実験を MPS 法による MCCI 解析の検証対象に選定し、MPS 法の三次元 MCCI 解析を実施した。粗骨材、側壁クラスト、スラグ膜、クラスト融解等、珪質岩系コンクリートの非等方浸食をもたらすと考えられる因子を MPS 法の三次元 MCCI 解析モデルに組み込み、どのようにこれらが非等方浸食をもたらすのかを検討した。解析結果と実験結果の比較から新たな MPS 法の MCCI 解析手法の妥当性を示した。

新たな MPS 法による VULCANO VB-U7 実験の解析結果と実験データを分析し、溶融物・クラスト相互作用の違いが MCCI におけるコンクリートの等方浸食／非等方浸食の違いをもたらす可能性を示した。特に、珪質岩系コンクリートでは粗骨材が側壁クラスト形成を阻害する一方で、底部ではヒートシンクの役割を果たし、クラストを安定化させ、非等方浸食をもたらす機構が考えられることが示された。解析結果は実験データや過去の研究と良く整合しており、新たな MPS 法の MCCI 解析手法の妥当性が示された。

## ③ 数学による離散化手法の検討

非圧縮単相流れに対して解析力学と非平衡熱力学に基づいた定式化を行った。具体的には GENERIC に習い、歪対称の Poisson 作用素に正定値対称の散逸作用素を組み合わせた形で定式化することを検討し、Poisson 括弧と散逸括弧を定式化できた。また、その定式化によって表されるメカニズム（すなわち作用素の歪対称性と正定値対称性）が離散化後も正確に保存するような数値解法（構造保存型数値解法）を検討し、そのような保存性が得られる離散変分導関数法を提案できた。

本研究で考案した構造保存型数値解法に対して具体的な数値計算アルゴリズムを、まずはメッシュ法をベースに開発し、それに基づいて計算コードを作成した。粘性の小さな溶融炉心の spreading におけるような乱れた流動の解析能力を評価するベンチマーク解析を実施し、開発した構造保存型数値解法の有効性を検証した。次に、Hamilton 力学的定式化による MPS 法 (HMPS 法) に対しても同様なベンチマーク解析を実施した。HMPS 法による非粘性の周期渦列のベンチマーク解析により、メッシュ法に基づく構造保存型数値解法と同様に HMPS 法でもエネルギーを保存させることに成功した。一方、メッシュ法とは異なり、HMPS 法ではヘリシティ等の速度勾配に依存する量の保存性がないため、渦列が早期に崩壊することが明らかになった。このことに起因する MPS 法の解析精度の悪化を改善するために、速度勾配テンソルを未知関数とする定式化を検討した。

## ④ MPS 法によるデブリ流下・集中挙動の計算機実験

電力中央研究所で実施された伝熱及びアブレーションを伴わない模擬デブリ流下実験（等温実験）に対応する MPS 法の解析（等温解析）を実施した。電力中央研究所より実験体系の CAD データ及び模擬デブリの流下条件、物性データを取得し、MPS 法の解析体系を構築した。電力中央研究所と連携して模擬デブリの流下位置、量、粘性等の実験パラメータを定め、MPS 法の等温解析を実施し、実験結果と比較し、MPS 法の解析の妥当性を分析した。MPS 法の等温解析の結果、界面の正確な捕捉に十分な解像度が得られていることと、模擬デブリの流下時に数値的な不連続性が生じないことを確認し、適切な実験条件と解析条件を定めた。これらの条件では、模擬デブリ流下・集中挙動の解析結果は測定データと良く一致し、MPS 法の解析の妥当性を確認した。

次に、電力中央研究所で実施された伝熱及びアブレーションを伴う模擬デブリ流下実験に対応する MPS 法の解析を実施した。模擬デブリの流下位置と流量は等温実験と同じ条件を基準に、流下流量を変更したケースも実験及び解析の対象とした。これらの条件で、模擬ペDESTAL床に有意なアブレーションが生じるように模擬デブリの初期温度を定めた。いずれのケースでも MPS 法による解析結果は実験結果と定性的に良く一致していることを確認した。また、本研究のスコープには定量的な予測精度を向上するための大規模並列計算は含まれていないが、適切な乱流モデル・パラメータを利用することで、限られた計算機資源の制約下でも定量的な解析精度の向上が可能であることを示すことに成功した。以上により、MPS 法による溶融物の流下・集中挙動解析手法を確立した。

## (2) 模擬デブリ流下実験による MPS 解析結果の妥当性の検証（再委託先：電力中央研究所）

MPS 法による解析の妥当性を確認するために、模擬デブリ（シリコン油）が床面に衝突して堆積し、流出する現象を定量的に示す模擬デブリの三次元流動可視化・計測実験の体系を構築した。床面構造として原子炉格納容器ペDESTALを縮小した三次元 CAD 図を作成し、三次元造形した。更に、光学カメラ（三方向）、二次元レーザー変位計、微小重量計を設置し、溶融物の界面形状を可視化し、溶融物の流出量を時間の関数として定量化できる実験体系を構築した。

構築した体系を用いて先ず、溶融物による床構造のアブレーションを伴わない等温条件で実験（等温実験）を実施した。早稲田大学と連携し、模擬デブリの流下位置、量、粘性（50、200、1000、5000 mm<sup>2</sup>/s）等の実験パラメータを定め、デブリの三次元流下挙動の可視化データを取得した。異なるスケールで実験し、スケール効果も分析した。いずれのケースでもシリコン油流下部の延長線上は液膜が薄く、横方向外縁では慣性力を失って水力跳躍により盛り上がった。このような光学観察と重量物時系列データが得られたことから、作製した装置及び実験体系が MPS 法解析の妥当性確認に必要なデータを与えることができることを確認した。次に同様な条件で床材に融点の低い材料を用い、模擬デブリによる床のアブレーションを伴う流下挙動を可視化し、MPS 法の解析結果の検証データを取得した。模擬デブリの流下位置と流量は等温実験と同じ条件を基準にした。これらの条件で、模擬ペDESTAL床に有意なアブレーションが生じるように模擬デブリの初期温度を定めた。光学カメラとサーモグラフィーを用いて流下挙動を温度分布と共に可視化し、サンプルピット部及び搬出口からの流出量を、重量計を用いて時系列計測し、MPS 法の解析の妥当性確認に適したデータを取得した。

## (3) UO<sub>2</sub> 流下実験による基礎データ取得（再委託先：大阪大学）

液滴が固体表面に衝突した際の spreading 挙動を観察するため、ガス浮遊法によってコニカルノズル上に液滴試料を浮遊させた上で、以下の2つの方法を検討した。1つ目は、コニカルノズルを分割することで試料を落下させ、コニカルノズル下部に設置した基板へ衝突させる方法である。2つ目は、コニカルノズル上に浮遊した液滴試料に側面からハンマーを衝突させる方法である。これらの方法の検討のために、分割式のコニカルノズル、加熱レーザー用光学系、液滴試料に衝突させるハンマー、衝突した試料の広がり挙動を観察するためのハイスピードカメラとレンズ、バックライト、液滴試料の温度を測定するための放射温度計から構成されるガス浮遊溶融装置を作製した。作製した装置を用いて、試料を落下させて基板に衝突させる方法とハンマーを試

料へ衝突させる方法を検討した結果、試料を落下させて基板に衝突させる方法を用いることで  $\text{Al}_2\text{O}_3$  液滴が変形し広がる様子が観察できることが明らかになった。

まず、 $\text{UO}_2$  の模擬物質を用い、作製したガス浮遊溶融装置によって spreading の様子を観察することで、試料の作製から spreading 観察までの技術を確立した。 $\text{UO}_2$  の模擬物質として  $\text{ZrO}_2$  と  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粉末を混合して  $1600^\circ\text{C}$  程度の高温で焼結し、得られた焼結体を粉碎して小片を取り出すことで、ガス浮遊溶融実験に用いることが可能な、組成を制御した試料を作製した。得られた  $\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  試料を用いて、ガス浮遊溶融装置と分割式コンカルノズル装置により、液滴衝突実験を行った。試料の組成や温度を変化させた実験を行い、液滴試料が基板に衝突して変形していく様子をハイスピードカメラで観察した。これにより、試料作製から spreading 観察までの技術を確立した。

次に、 $\text{UO}_2$  に  $\text{ZrO}_2$  等の酸化物を混合した、 $(\text{U}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{O}_2$  ( $x = 0.1\text{-}1.0$ ) 試料を作製して試料の組成や温度が spreading へ与える影響を系統的に調べる液滴落下実験を行った。 $\text{ZrO}_2$  の液滴試料を  $\text{Al}_2\text{O}_3$  基板上に落下させた場合は  $\text{ZrO}_2$  液滴が  $\text{Al}_2\text{O}_3$  基板へ付着したのに対し、 $\text{BN}$  と  $\text{ZrO}_2$  基板に落下させた場合は液滴が反跳した。 $\text{UO}_2$  を混ぜた試料では、 $x = 0.9$  の試料では  $\text{ZrO}_2$  と同様の結果となった。これらの実験により、液滴が落下衝突する際の挙動は基板との反応の有無が大きな影響を与えることや、 $\text{UO}_2$  は蒸発が顕著であることが明らかとなった。

更に、ガス浮遊溶融装置を利用して溶融物の粘性、密度、表面張力を評価する技術を確立した。粘性と密度の測定技術は文献を参考にしたものであるが、表面張力の評価技術は本研究において新たに考案した技術である。これらにより、 $\text{ZrO}_2$  の粘性と密度の測定に世界で初めて成功し、早稲田大学との連携により、 $\text{UO}_2$  等の蒸気圧の高い試料にも適していると考えられる新しい方法で粘性の評価ができる可能性を見出し、当初の想定を超える成果が得られた。

## 全体のまとめ

Moving Particle Semi-implicit (MPS) 法は、ラグランジュ法に基づく粒子法の一つであり、自由界面は粒子の運動で正確に求めることができ、オイラー法の解析で問題となる界面での数値拡散が生じず、対流項を解く必要もない。そのため、原子炉過酷事故時の溶融物挙動の基本的な現象を支配する伝熱・流動・相変化の複雑な相互作用を従来のオイラー法に基づく解析手法に比べ、より機構論的に理解できると考えられる。そこで本研究は、原子炉過酷事故時の Ex-Vessel 溶融物の spreading やそれによるアブレーション現象を伴う、溶融物の流下・集中挙動を対象に、MPS 法による計算機実験、模擬デブリ流下実験、 $\text{UO}_2$  流下実験による基礎データ取得により、Ex-Vessel 溶融物挙動の理解を深めることを目的とした。

MPS 法による Ex-Vessel 溶融物挙動の理解の深化のために、①MPS 法による Spreading 解析モデルの検討と理解の深化、②MPS 法による MCCI 解析モデルの検討と理解の深化、③数学による離散化手法の検討、④模擬デブリ流下実験（再委託先：電力中央研究所）と連携した MPS 法によるデブリ流下・集中挙動の計算機実験、⑤ $\text{UO}_2$  流下実験による基礎データ取得（再委託先：大阪大学）に取り組んだ。これらにより、以下の新たな知見・成果を得ることに成功した：

- ① 溶融物 spreading の流動先端に形成されるクラストと流動の固液相互作用の結果、クラストが次第に発達し、やがてバルク流動をせき止めて最終的に流動停止に至る機構を示すことに成功した。

- ② MCCI による珪質岩系コンクリートの非等方浸食は粗骨材が側壁クラスト形成を阻害する一方で、底部ではヒートシンクの役割を果たし、クラストを安定化させた結果もたらされた可能性を示した。
- ③ 新たな Poisson 括弧と散逸括弧の定式化に基づく構造保存型数値解法から離散変分導関数法を提案し、メッシュ法に基づく構造保存型数値解法と同様に HMPS 法でもエネルギーを保存させることに成功した。
- ④ 電力中央研究所と早稲田大学との連携により、模擬デブリにシリコン油を活用し、光学カメラ、二次元レーザー変位計、微小重量計を配置した三次元流動可視化・計測実験と MPS 法による三次元解析を実施し、MPS 法による溶融物の流下・集中挙動解析手法を確立した。
- ⑤  $UO_2$  に  $ZrO_2$  等の酸化物を混合した、 $(U_{1-x}Zr_x)O_2$  ( $x = 0.1-1.0$ ) 試料を浮遊溶融させ、落下時の spreading 挙動を観察することができるガス浮遊溶融装置を分割式のコンカルノズル、加熱レーザー用光学系、ハイスピードカメラ系、バックライト、放射温度計から構成し、模擬デブリ溶融物の試料作製から spreading 観察までの技術を確立した。

更に、当初の想定を超える以下の成果を得た。

- ⑥ 新たな MPS 法のアルゴリズムを考案し、クラストの再溶融だけでなく、実機事故条件で想定されるクラストの機械的な破断のモデル化に成功した。この新モデルを MPS 法に組み込み、FARO L-26S 実験で観測された、クラスト形成による流動の一時停止と、クラスト破断による再流動を機構論的に示すことに世界で初めて成功した。
- ⑦ ガス浮遊溶融装置を利用して溶融物の粘性、密度、表面張力を評価する技術を確立した。粘性と密度の測定技術は文献を参考にしたものであるが、表面張力の評価技術は本研究において新たに考案した技術である。これらにより、 $ZrO_2$  の粘性と密度の測定に世界で初めて成功し、大阪大学と早稲田大学との連携により、 $UO_2$  等の蒸気圧の高い試料にも適していると考えられる新しい方法で粘性の評価ができる可能性を見出した。

## 今後の展望

本研究により、従来のオイラー法に基づく解析とは異なるラグランジュ法に基づく MPS 法の改良と解析により、原子炉過酷事故時の溶融物挙動の理解の深化と、溶融物基礎物性データ取得手法の確立に成功した。今後は、本研究で参照した VULCANO 実験施設を有する仏国の原子力・代替エネルギー庁 (CEA) との連携や、従来のオイラー法に基づく THEMA コード等と本研究で改良した MPS 法によるベンチマーク解析等によるさらなる溶融物挙動理解の深化が期待できる。また、福島第一原子力発電所の燃料デブリの分布や性状を推定に資する MPS 法による解析や、推定精度向上のために必要な新たな実験の設計等に本研究で改良した MPS 法を活用することも有用と考えられる。また、本研究により、ガス浮遊法を用いて極めて融点が高い物質である  $ZrO_2$  の粘性等の物性測定に成功した。今後は、本研究で確立した技術を用いた  $UO_2$  やボライド等の重要な炉心溶融物の物性の解明が期待できる。

人材育成面では、本研究に直接に参加した若手の育成のみならず、早稲田大学や大阪大学からは博士後期課程を含む学生 20 名以上が原子炉過酷事故、安全研究に取り組んでおり、日本と世界の将来の原子力エネルギーの安全な平和利用に大きく貢献すると期待される。

## 1. はじめに

福島第一原子力発電所の事故後、過酷事故(SA)解析コードの高度化が図られている [1] [2]が、物理現象に着目したモデリングの研究は限られている [3] [4]。SA 解析コードを高度化するには、基本現象の深い理解に立った上で、実用的な解析を行うために必要となるモデルの簡素化を議論する必要がある。原子炉容器外 (Ex-Vessel) 溶融物挙動のうち、溶融物が原子炉格納容器 (PCV) 床面に放出された直後の伝熱・流動・相変化を伴う溶融物の広がり挙動 (spreading) と、その後の長時間におよぶ溶融物とコンクリートの相互作用 (MCCI) は格納容器健全性や事故後の廃炉工程に大きな影響をおよぼす。特に spreading の停止位置は、原子炉格納容器バウンダリを高温の溶融物が直接過熱するかどうかを決定するために格納容器健全性の評価のために重要である。同様に、PCV 床面コンクリートの MCCI による浸食は、放射能閉じ込め機能の喪失を評価するために重要であるため、コンクリートの浸食率や浸食パターンを正確に予測する必要がある。

従来の解析手法による予測ではこれらの溶融物挙動の基本的な現象を支配する伝熱・流動・相変化のモデルに経験式が多用されているため、これらを含む重要な影響因子の複雑な相互作用を正確にモデル化できない。すなわち、固定された計算メッシュやグリッドで流体の運動を離散化する従来のオイラー法では、運動に伴う流体の自由界面の変化を正確に求めることが困難であり、spreading の解析で重要な自由界面の追跡には近似式や経験式が多用されている。例えば COREFLOW コードでは、溶融物の流動は高さ関数 (height function) により表され、経験的な式を用いて自由界面を解く必要がある [5]。又、MELTSREAD、LAVA、THEMA コードでは輸送方程式の垂直方向積分や速度プロファイルの解析上の近似に基づき、垂直方向の速度について平均値のみを計算することにより溶融物自由界面を計算する [6]。同様に、MCCI 時の溶融物とコンクリートの界面での熱流束や、コンクリートの浸食に伴う自由界面の変化を近似的に求める必要がある。例えばコンクリートの横方向への浸食率が下方向への浸食率に比べて高い実験等から、それぞれの方向への実効熱伝達率が経験的に求められている [7]。これらのため、以下の問題がある：

- 解析結果同士及び解析結果と実験結果の相違を基本的な物理現象に立ち戻って議論できない。
- 経験式を多用するため、解析値と測定値の一致が必ずしもモデルの妥当性や汎用性を保証しない。

一方、PCV 床面の凹部 (例：sump pit) に崩壊熱を伴うデブリ (溶融物) が流下・集中すると安定冷却が困難になり、MCCI によるコンクリート侵食を止められなくなる可能性がある [8]が、既存の解析手法には上述のような問題点があるため、このような現象を十分な精度で予測することができない。又、約 3,000K に達する高温の溶融炉心の spreading や MCCI 挙動を系統的に分析できるような実験の実施は極めて困難である。

そこで、溶融物挙動の基本的な現象を支配する伝熱・流動・相変化のモデルに経験式を使わず、溶融物挙動を支配する因子の複雑な相互作用を正確にモデル化する解析により、Ex-Vessel 溶融物挙動の理解を深める必要がある。Moving Particle Semi-implicit (MPS) 法は、流体の運動に合わせて計算点 (粒子) が運動するラグランジュ法に基づく粒子法の一つであり、非圧縮性流体の Navier-Stokes 運動方程式 (NS 運動方程式) を粒子間相互作用モデルと重み関数によって離散化する手法である [9]。このため、自由界面は粒子の運動で正確に求めることができ、経験式や近似式が不要である。又、伝熱・流動を支配する微分方程式に含まれる微分演算子は MPS 法の粒子間相互作用モデルと重み関数で離散化でき、オイラー法の解析で必要となるような対流項を解

く必要がなく、界面での数値拡散の問題も無い。更に、流動中の溶融物の物性変化を各粒子が正確に追跡するため、機構論的に溶融物の相変化をモデル化できる。

MPS 法により溶融物挙動の理解を深めるには、その支配因子の抽出とモデル化だけでなく、それらの相互作用に影響する計算手法（アルゴリズム）の精度向上や、系統的な実験データとの比較による妥当性の確認、MPS 法では求めることができない核燃料（ $UO_2$ ）を含む溶融物の基礎データの取得が必要である。以上のように、計算科学、数学、熱流動工学、核燃料・材料工学等の分野を横断した Multi-physics モデリングにより、Ex-Vessel 溶融物挙動の理解を深めることができると考えられる。

これまでの MPS 法による spreading 解析研究から、慣性力が支配する流動初期から粘性力が支配する流動後期までの挙動は精度よく解析できることが示されているが、最終的な spreading の停止機構が示されていない。過去の模擬溶融炉心を用いた spreading 実験では、spreading の流動先端に形成されるクラスト層が spreading の停止に影響している可能性が示唆されており [10] [11]、このような現象を MPS 法の解析で考慮し、spreading の停止機構を示すことが課題である。

又、これまでの MPS 法による MCCI 解析研究から、石灰岩系コンクリートの等方的な浸食挙動と珪質岩系コンクリートの非等方的な浸食挙動の違いを支配する因子が推定されているが [12]、いずれの解析も二次元体系で行われており、実験が行われた実際の三次元体系ではモデルの妥当性が示されていない。MCCI によるコンクリートの非等方浸食の機構を MPS 法により示すことが課題である。

既存の MPS 法の離散化手法は上記の課題に取り組むには十分な精度を有していると考えられるが、将来的な大規模・高精度解析による溶融物挙動の推定に活用する場合には、現状よりも精度を向上することが必要になる可能性がある。例えば既存の MPS 法では、離散化後に運動エネルギーが厳密には保存しない [13] ため、先ずはその問題を解決するための知見を得ることが課題である。

MPS 法による溶融物の流下・集中挙動の予測モデルの妥当性を確認するには、様々な条件の溶融物の流下・集中挙動実験が必要であるが、これまでにそのような系統的な実験は行われていない。MPS 法による解析と整合する体系での系統的な模擬デブリ流下実験による MPS 解析結果の妥当性の検証が課題である。

およそ 3,000K に達する高温の二酸化ウラン（ $UO_2$ ）を含む模擬デブリを大量に流下させるような実験を系統的に実施することは困難であるが、少量の  $UO_2$  を用いた系統的な実験により基礎データを取得して、MPS 法による溶融物の流下・集中挙動解析に反映させることは可能と考えられる。その際、 $UO_2$  流下実験による基礎データ取得が課題である。

以上より、本研究は、原子炉過酷事故時の Ex-Vessel 溶融物の spreading やそれによるアブレーション現象を伴う、溶融物の流下・集中挙動を対象に研究する。MPS 法による計算機実験、模擬デブリ流下実験、 $UO_2$  流下実験による基礎データ取得により、Ex-Vessel 溶融物挙動の理解を深めることを目的とする。

## 2. 業務計画

### 2.1. 全体計画

本研究の目的は、原子炉過酷事故時の Ex-Vessel 溶融物の spreading やそれによるアブレーションを伴う、溶融物の流下・集中挙動を対象に、MPS 法による計算機実験、模擬デブリ流下実験、UO<sub>2</sub> 流下実験による基礎データ取得により、Ex-Vessel 溶融物挙動の理解を深めることである。この目的を達成するために、本研究計画は、以下から構成される：

(1) MPS 法解析による ex-vessel spreading 現象理解の深化

- ① MPS 法による Spreading 解析モデルの検討と理解の深化
- ② MPS 法による MCCI 解析モデルの検討と理解の深化
- ③ 数学による離散化手法の検討
- ④ MPS 法による溶融物流下・集中挙動の計算機実験

(2) 模擬デブリ流下実験による MPS 解析結果の妥当性の検証（再委託先：電力中央研究所）

(3) UO<sub>2</sub> 流下実験による基礎データ取得（再委託先：大阪大学）

MPS 法解析による ex-vessel spreading 現象理解の深化は早稲田大学で実施する。模擬デブリ流下実験による MPS 解析結果の妥当性の検証は電力中央研究所で実施する。UO<sub>2</sub> 流下実験による基礎データ取得は大阪大学で実施する。全体の研究推進は早稲田大学がとりまとめる。これらの全体計画を表 2.1-1 に示す。

(1) MPS 法による Ex-Vessel 溶融物挙動の理解の深化

① MPS 法による Spreading 解析モデルの検討と理解の深化

過去に実施された Ex-Vessel 溶融物の spreading 実験データ等を用いて MPS 法の spreading 解析モデルの検討及び解析を実施し、モデルの妥当性を検討する。特に、流動先端に形成されるクラスト等の spreading の停止機構に関連する現象に着目し、MPS 法による解析で spreading の停止機構を示す。

② MPS 法による MCCI 解析モデルの検討と理解の深化

過去に実施された Ex-Vessel 溶融物による MCCI 実験データを用いて MPS 法の MCCI 解析モデルの検討及び解析を実施し、モデルの妥当性を検討する。特に、珪質岩系コンクリートの MCCI に見られる非等方浸食の機構に関連する現象に着目し、MPS 法による解析で非等方浸食の機構を示す。

③ 数学による離散化手法の検討

将来の MPS 法の抜本的な改良（離散化後の運動エネルギーの厳密な保存などによる計算精度の向上）に向けた数学による精緻な離散化手法を検討する。Hamilton 力学的定式化による MPS 法 (HMPS 法) やメッシュ法とのベンチマーク解析により MPS 法の課題を明らかにする。又、その解決に向けた知見を得る。

④ MPS 法による溶融物流下・集中挙動の計算機実験

MPS 法による計算機実験を行い、Ex-Vessel で予想される溶融物の流下と床面凹部への集中挙動を明らかにすることを目標に、他の研究項目の実施から得られる知見・データを反映させた MPS 法による計算機実験を行う。異なる初期条件（例えば、溶融物の初期温度や流量）がデブリの流下挙動や格納容器床面に見られる凹部への集中におよぼす影響を明らかにする。

(2) 模擬デブリ流下実験による MPS 解析結果の妥当性の検証（再委託先：電力中央研究所）

MPS 法の計算機実験と同様な条件で模擬デブリ（溶融物）流下実験を行い、MPS 法の解析結果の妥当性を検証する。模擬デブリを流下させ、デブリの溶融流出を可視化し、その挙動予測のために重要なパラメータを明らかにする。MPS 法による計算機実験（研究項目(1)④）の検証に必要なデータを提供する。

(3) UO<sub>2</sub> 流下実験による基礎データ取得（再委託先：大阪大学）

UO<sub>2</sub> 流下挙動の基礎的なデータを得る。浮遊させた UO<sub>2</sub> 試料を CO<sub>2</sub> レーザーで照射加熱し、落下する溶融 UO<sub>2</sub> 試料の spreading 挙動をハイスピードカメラで撮影することで可視化する。試料の組成や温度等をパラメータに系統的なデータを取得し、MPS 法による計算機実験(研究項目(1)④)に必要なデータを提供する。

(4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連携を密にして研究を進める。

表 2.1-1：年度別全体計画

	平成28年度	平成29年度	平成30年度
(1) MPS法による溶融物挙動理解の深化（早大） ①Spreading ②MCCI ③数学（離散化） ④計算機実験 (2) 模擬炉心溶融物流下試験によるMPS解析結果の妥当性の検証（電中研） (3) UO <sub>2</sub> 流下試験による基礎データ取得（阪大） (4) 研究推進		MPS法の改良と検証	計算機実験
	解析対象の選定と体系構築	Spreadingモデル検討と検証	
	解析対象の選定と体系構築	MCCIモデル検討と検証	
	非圧縮単相流れの構造 保存型数値解放の定式化	数値計算アルゴリズム開発	ベンチマーク解析・評価
		計算体系の構築	計算機実験
	三次元可視化手法の検討	試験体系の構築・実施 (浸食無し)	試験体系の構築・実施 (浸食有り)
	ガス浮遊溶融装置の作成	UO <sub>2</sub> spreading観察技術の確立	実験とデータ取得
	まとめ・評価	まとめ・評価	まとめ・評価

## 2.2. 各年度計画

### 2.2.1. 平成 28 年度の成果の目標及び業務の実施方法

#### (1) MPS 法による Ex-Vessel 溶融物挙動の理解の深化

##### ① MPS 法による Spreading 解析モデルの検討と理解の深化

Ex-Vessel 溶融物の spreading 挙動を解析する MELTSPREAD コードの過去の検証に用いられた実験マトリックス [14]を精査し、MPS 法による spreading 解析の検証対象を選定し、解析体系を構築する。主な検討対象は VULCANO VE-U7 実験 [11]とし、解析に必要な情報はこれらの実験の公開情報及び MELTSPREAD コードの検証レポート [14]より得る。溶融物が固化する過程における粘性の変化は他の検証にも広く用いられている Ramacciotti モデル [15]を用いることを検討し、試解析を実施する。

##### ② MPS 法による MCCI 解析モデルの検討と理解の深化

Ex-Vessel 溶融物による MCCI を解析する CORQUENCH コードの過去の検証に用いられた実験マトリックス [16]を精査し、MPS 法による MCCI 解析の検証対象を選定し、解析体系を構築する。主な検討対象は三次元 MCCI 実験である VULCANO VB-U7 実験 [17]とし、必要な情報を実験の公開情報及び CORQUENCH コードの検証レポート [16]等より得る。クラスト非等方形形成のモデルを三次元 MCCI 実験体系に導入し、試解析を実施する。

##### ③ 数学による離散化手法の検討

非圧縮単相流れに対して解析力学と非平衡熱力学に基づいた定式化を行う。具体的には GENERIC [18]に習い歪対称の Poisson 作用素に正定値対称の散逸作用素を組み合わせた形で定式化することを検討する。また、その定式化によって表されるメカニズム（すなわち作用素の歪対称性と正定値対称性）を離散化後も正確に保存するような数値解法（構造保存型数値解法）を離散変分導関数法の手法に基づいて検討する。

#### (2) 模擬デブリ流下実験による MPS 解析結果の妥当性の検証（再委託先：電力中央研究所）

模擬デブリ（溶融物）が床面に衝突して堆積し、流出する現象を定量的に示す。MPS 解析の妥当性を確認するために必要な溶融物の界面形状を複数の光学カメラで撮影し三次元流動を可視化すると共に、流出量を時間の関数として定量化する。早稲田大学と連携し、MPS 法による計算機実験との整合性を備えた体系により、MPS 法による計算機実験の検証に必要なデータを提供するとともに、デブリ挙動の予測のための重要なパラメータを明らかにする。

#### (3) UO<sub>2</sub> 流下実験による基礎データ取得（再委託先：大阪大学）

液滴が固体表面に衝突した際の広がり挙動を観察するため、ガス浮遊法によってコニカルノズル上に液滴試料を浮遊させた上で、以下の 2 つの方法を試みる。1 つ目は、コニカルノズルを分割することで試料を下へ落下させ、コニカルノズル下部に設置した基板へ衝突させる方法である。2 つ目は、コニカルノズル上に浮遊した液滴試料に側面からハンマーを衝突させる方法である。本年度は、これらの方法による衝突試験の実現性や妥当性を検証し、適切な手法を選定するための実験体系を構築する。具体的には、分割式のコニカルノズル、加熱レーザー用光学系、液滴試料に衝突させるハンマー、衝突した試料の広がり挙動を観察するためのハイスピードカメラとレ

ンズ、バックライト、液滴試料の温度を測定するための放射温度計から構成される液滴衝突試験装置を作製する。

#### (4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連携を密にして研究を進める。

### 2.2.2. 平成 29 年度の成果の目標及び業務の実施方法

#### (1) MPS 法による Ex-Vessel 溶融物挙動の理解の深化

##### ① MPS 法による Spreading 解析モデルの検討と理解の深化

平成 28 年度に選定した VULCANO VE-U7 の spreading 実験 [11] を MPS 法により解析する。spreading 全般を支配すると考えられる因子（溶融物から床面等への伝熱と溶融物の粘性変化を考慮した流動）と spreading の停止を支配すると考えられる因子（溶融物の固化と固化物が床面等に固着することによる流動先端のクラスト形成）がどのように spreading に影響するのかを定量的に明らかにするため、MPS 法に新たにクラスト形成モデルを組み込み、試解析を実施する。解析結果と実験結果の比較から新たな MPS 法の spreading 解析手法の妥当性を示す。

##### ② MPS 法による MCCI 解析モデルの検討と理解の深化

平成 28 年度に選定した三次元 MCCI 実験である VULCANO VB-U7 実験 [17] を MPS 法により解析する。粗骨材、側壁クラスト、スラグ膜、クラスト融解等、珪質岩系コンクリートの非等方浸食をもたらすと考えられる因子を MPS 法の三次元 MCCI 解析モデルに組み込み、どのようにこれらが非等方浸食をもたらすのかを検討する。解析結果と実験結果の比較から新たな MPS 法の MCCI 解析手法の妥当性を示す。

##### ③ 数学による離散化手法の検討

平成 28 年度に考案した構造保存型数値解法に対して具体的な数値計算アルゴリズムを先ずはメッシュ法をベースに開発し、それに基づいて計算コードを作成する。粘性の小さな溶融炉心の spreading におけるような乱れた流動の解析能力を評価するベンチマーク解析を実施し、開発した構造保存型数値解法の有効性を検証する。

##### ④ MPS 法によるデブリ流下・集中挙動の計算機実験

電力中央研究所で実施される模擬デブリ流下実験に対応する MPS 法の解析を実施する。電力中央研究所より実験体系の CAD データ及び模擬デブリの流下条件、物性データを取得し、MPS 法の解析体系を構築する。電力中央研究所と連携して模擬デブリの流下位置、量、粘性等の実験パラメータを定め、MPS 法の等温解析を実施し、実験結果と比較し、MPS 法の解析の妥当性を分析する。

#### (2) 模擬デブリ流下実験による MPS 解析結果の妥当性の検証（再委託先：電力中央研究所）

平成 28 年度に構築した BWR Mark-I 型格納容器を模した実験体系を用いて模擬デブリ流下実験を実施する。平成 29 年度は溶融物による床構造のアブレーションを伴わない等温条件で実験を実施する。早稲田大学と連携し、模擬デブリの流下位置、量、粘性等の実験パラメータを定め、デブリの三次元流下挙動の可視化データを取得する。異なるスケールで実験し、スケール効果も分析する。

### (3) UO<sub>2</sub> 流下実験による基礎データ取得（再委託先：大阪大学）

UO<sub>2</sub> の模擬物質を用い、平成 28 年度に作製したガス浮遊溶融装置によって spreading の様子を観察することで、試料の作製から spreading 観察までの技術を確認する。UO<sub>2</sub> の模擬物質として CeO<sub>2</sub> や ZrO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等の酸化物を用い、所定の組成になるように混合した粉末を 1600℃程度の高温で焼結する粉末冶金的手法によってペレット状の緻密な試料を作製する。このペレットを破碎して小片を取り出し、平成 28 年度に作製したガス浮遊溶融装置によって浮遊溶融させる。試料が溶融した後、溶融試料の基板上的 spreading の様子をハイスピードカメラで撮影する。

### (4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連携を密にして研究を進める。

## 2.2.3. 平成 30 年度の成果の目標及び業務の実施方法

### (1) MPS 法による Ex-Vessel 溶融物挙動の理解の深化

#### ① 数学による離散化手法の検討

平成 29 年度に開発したメッシュ法による構造保存型数値解法に対して行ったベンチマーク解析の知見を活用し、Hamilton 力学的定式化による MPS 法（HMPS 法）に対しても同様なベンチマーク解析を実施する。両者のベンチマーク解析結果を比較検討することによって、MPS 法特有の問題点を抽出し、MPS 法の解析精度の抜本的な改善方法を検討する。

#### ② MPS 法によるデブリ流下・集中挙動の計算機実験

平成 29 年度までに整備した MPS 法の解析コードを用い、電力中央研究所で実施される伝熱及びアブレーションを伴う模擬デブリ流下試験に対応する MPS 法の解析を実施する。電力中央研究所と連携して、模擬デブリの流下位置、量、初期温度等の試験パラメータを定める。MPS 法の解析結果と試験結果を比較し、MPS 法の解析の妥当性を分析する。

### (2) 模擬デブリ流下実験による MPS 解析結果の妥当性の検証（再委託先：電力中央研究所）

平成 29 年度に実施したものと同等な条件で、BWR Mark-I 型格納容器ペダスタル床を模した床材に融点の低い材料を用い、床材のアブレーションを伴う模擬デブリの流下実験を行う。早稲田大学と連携して、模擬デブリの流下位置、量、初期温度等の試験パラメータを定める。模擬デブリによる床のアブレーションを伴う流下挙動を可視化し、MPS 法の解析結果の検証データを取得する。

### (3) UO<sub>2</sub> 流下実験による基礎データ取得（再委託先：大阪大学）

UO<sub>2</sub> に ZrO<sub>2</sub> 等の酸化物を混合した、模擬溶融コリウムの spreading の様子を観察する。UO<sub>2</sub> を混合した試料は、水素ガスを混合した還元雰囲気中で焼結して作製する。作製した試料をガス浮遊溶融装置を用いて浮遊溶融させ、基板上へ落下させて spreading の様子を観察する。パラメータとして試料の組成と試料を落下させる際の試料温度等を変化させ、これらのパラメータが spreading へ与える影響を系統的に調べて基礎的なデータを取得する。

### (4) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連携を密にして研究を進める。

### 3. 業務の実施内容及び成果

#### 3.1. MPS 法による Ex-Vessel 溶融物挙動の理解の深化

##### 3.1.1. MPS 法による spreading 解析モデルの検討と理解の深化

##### 3.1.1.1. 平成 28 年度の実施内容及び成果

###### (1) Spreading 実験マトリックス

MPS 法による spreading 解析のモデルの開発及び開発した解析コードの検証のために適する過去の spreading 実験を調査し、それらをマトリックスとして整理した。これらの調査には主に、過去の spreading 解析コードの検証に用いられた米国アルゴンヌ国立研究所の報告書 [14]等を参考にした。各実験の概要をまとめた実験マトリックス（実験概要）を表 3.1-1 に示す。また、これらの実験で測定されたデータを表 3.1-2 に示す。

これらの情報を元に本研究では、以下の特徴から VOLCANO VE-U7 実験を選定した：

- 固相線-液相線温度差が大きく、固液相変化の広い範囲にわたって溶融物の粘性が変化し、それが流動におよぼす影響をとらえることができる。このような広い固液相変化範囲は、炉心酸化物のような混合溶融物に特有である。
- 流動停止時のクラスト形成が実験でも報告されており、流動が最終的に溶融物の粘性増大のみならず、流動先端に形成されるクラストによって停止している様子がとらえられている。
- 用いられている溶融物の組成が実際の原子炉過酷事故時に想定されるコリウムに近い炉心酸化模擬物質である。

表 3.1-1：Spreading 実験マトリックス（実験概要）

プログラム	試験 ID	流体種別	床種別	体系形状	床面の状態
N/A	1-D dam break	水	不活性壁	一次元チャンネル	N/A
Theofanous	Run no. 1	水	不活性壁	1/10 スケール BWR Mark-I 格納容器	N/A
	Run no. 2	水			
Corine	WAT_Q1.5_G0	水	不活性壁	17° セクターチャンネル	N/A
	WAT_Q0.5_G0				
	HEC_3_G0_0.1				
	HEC_3_G0_2				
RIT	3MDC-Ox-1	模擬酸化コリウム	コンクリート	一次元チャンネル	Dry
	3MDS-Ox-1		スチール		
	3MDS-Ox-2		スチール		
	2MWS-Ox-1		スチール		
	2MWS-Ox-2		スチール		
	2MWS-Ox-3		スチール		
KATS	KATS-12	鉄	セラミック	一次元チャンネル	Dry
		酸化模擬物質			
	KATS-13	鉄	コンクリート		
		酸化模擬物質			
KATS-14	鉄	セラミック			
	酸化模擬物質				
ECOKATS	V1	酸化模擬物質	セラミック	一次元チャンネル	Dry
	1		コンクリート		
	2		コンクリート		
SPREAD	Test 15	ステンレス鋼	コンクリート	180° セクターチャンネル	Dry
	Test 21				水 (7 cm 水深)
COMAS	COMAS-5a	炉心酸化模擬物質 + 鉄	コンクリート	一次元チャンネル	Dry
			セラミック		
			スチール		
	EU-2b		コンクリート		
	EU-4		セラミック		
FARO	L-26S	炉心酸化模擬物質 + 鉄	スチール	17° セクターチャンネル	Dry
	L-32S		水 (1 cm 水深)		
VOLCANO	VE-U7	炉心酸化模擬物質 + 鉄	コンクリート	9.5° セクターチャンネル	Dry
			セラミック		

表 3.1-2 : Spreading 実験マトリックス (測定データ)

プログラム	試験 ID	取得情報						
		流動先端 vs. 時間	流動距離	試験後デブリ状態	床面浸食	床面温度	温度 vs 時間	溶融物高さ vs 時間
N/A	1-D dam break	√	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	√
Theofanous	Run no. 1	√	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	√
	Run no. 2	√	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	√
Corine	WAT_Q1.5_G0	√	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
	WAT_Q0.5_G0	√	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
	HEC_3_G0_0.1	√	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
RIT	HEC_3_G0_2	√	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
	3MDC-0x-1	√	√	√		√		
	3MDS-0x-1	√	√	√				
	3MDS-0x-2	√	√	√				
	2MWS-0x-1		√					
	2MWS-0x-2		√					
KATS	2MWS-0x-3		√					
	KATS-12	√	√	√			√	
	KATS-13	√	√	√			√	
		√	√	√			√	
	KATS-14	√	√	√	√		√	
√		√	√			√		
ECOKATS	V1	√	√	√				
	1	√	√			√		
	2	√				√	√	
SPREAD	Test 15		√	√				
	Test 21		√	√				
COMAS	COMAS-5a	√	√					
		√	√					
		√	√			√		
	EU-2b	√	√					
		√	√					
		√	√					
EU-4	√	√						
FARO	L-26S	√	√	√				
	L-32S	√	√	√				
VOLCANO	VE-U7	√	√	√		√		
		√	√	√		√		

N/A : 該当無

## (2) VULCANO VE-U7 実験の MPS 法による試解析

従来の MPS 法による spreading 解析では、溶融物の固相率がある閾値を超え、固化したと判定された粒子も後述する数値的なクリープ現象のために流動が完全には停止しない問題があった。そこで、本研究では先ず、MPS 法の spreading 解析モデルに以下に示す簡単なクラストモデルを新たに導入した。本モデルでは、固化粒子が壁や床粒子と接触した場合に、その運動を停止させる（座標を固定する）ことでクラストの停止をモデル化した。本モデルによって運動を停止した粒子を以降、固着粒子 (immobilized particle) と呼ぶ。固化粒子が固着粒子に接触した場合も同様に、その運動を停止させる。図 3.1-1 にクラストモデルの概念を示す。固化した粒子が、壁粒子や床粒子、固着粒子と接触するまで、周囲の流動に従って運動を続ける。最終的には、固着粒子がクラスト層を形成し、流動を妨げる。また、形成されたクラスト層は溶融物からの熱により再溶融する可能性があるが、MPS 法では追跡する粒子のエンタルピーによって固液相変化を判定できるため、クラストの再溶融も自動的に考慮されている。再溶融は凝固と同様に、粒子の固相率が閾値を下回った際に判定する。この閾値を以降は固着固相率と呼ぶ。

新たに導入したクラストモデルを用いた試解析結果を図 3.1-2 に示す。ここで、濃紺の粒子は溶融物を表し、薄い青色粒子は固化した粒子（固相率が 70%以上）を表す。溶融物の上面は主に

輻射放熱により冷却され、表面が固化していく様子が分かる。一方、床面との界面では主に熱伝導により溶融物は冷却され、固化した粒子は床面に固着している。流動先端にはこれらの効果によってクラスト層が形成され、最終的に spreading の停止に至った。

図 3.1-3 にクラストモデルの導入以前と導入後の解析結果を比較して示す。従来の解析では流動先端が薄く伸び、実験で観測されたようなクラスト形成とそれによる spreading の停止が再現できなかったが、本研究で新たに導入したモデルはこの現象を定性的には良く再現している。これらの結果を参考に、平成 29 年度に解析結果の妥当性を定量的に検討することとした。

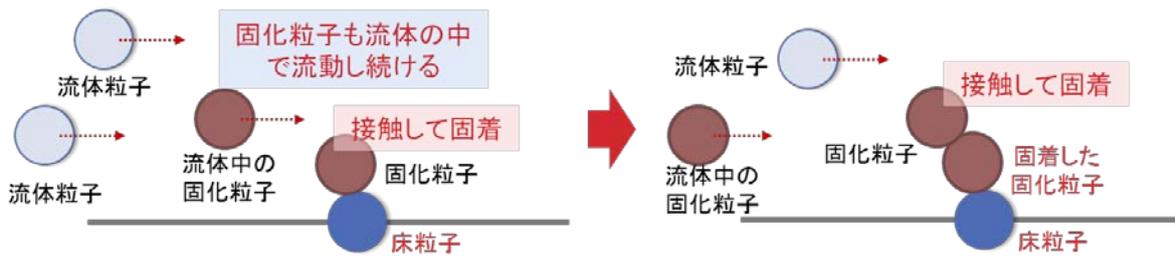


図 3.1-1 : クラストモデルの概念

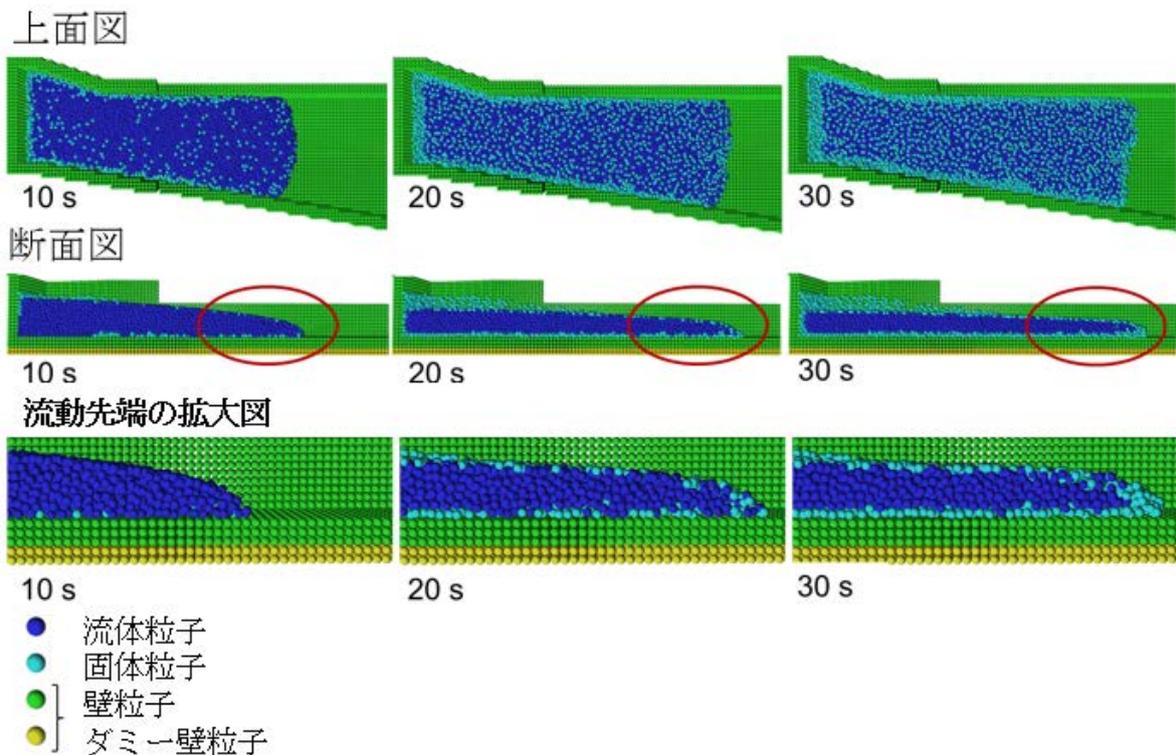
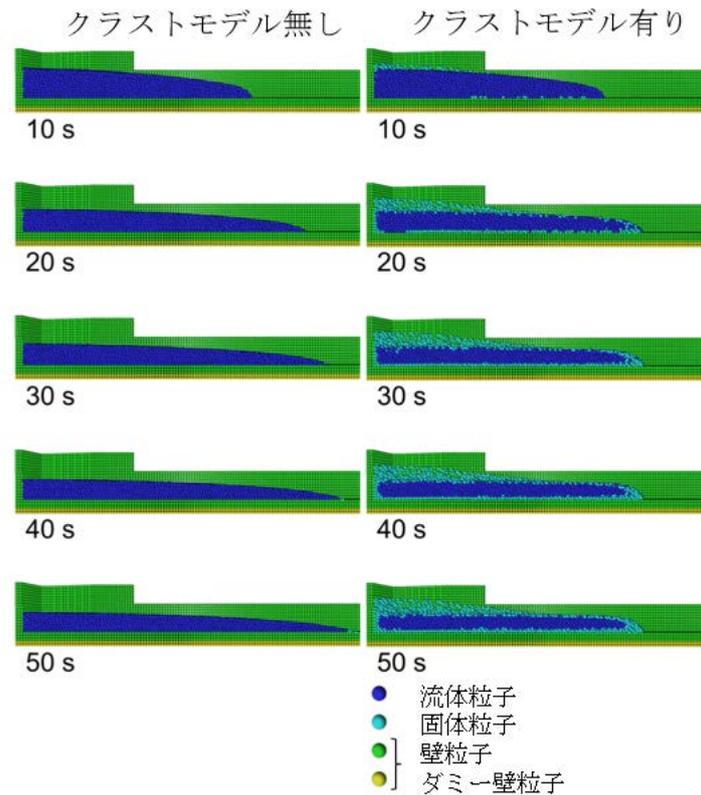


図 3.1-2 : クラストモデルを導入した MPS 法の試解析結果



(a) クラストモデル無し (b) クラストモデル有

図 3.1-3 : MPS 法クラストモデルの有無による Spreading の違い

### 3.1.1.2. 平成 29 年度の実施内容及び成果

#### (1) VULCANO VE-U7 実験の従来 MPS 法による解析

従来 MPS 法の課題の確認のため、従来 MPS 法を用いて VULCANO VE-U7 実験の解析を実施した。解析条件は、実験報告 [11]等を参考に表 3.1-3 にまとめた条件で解析した。溶融物の流入温度 (2,450 K) は液相線温度 (2,623 K) を下回っており、溶融物は部分的に固化した固液相変化中の状態で実験部に流入している。このとき、固液相変化中の溶融物の粘性は平成 28 年度の試解析と同様に、Ramacciotti らの提案する次の相関式 [15]を用いて評価した。

$$\mu(T) = \mu_{liq} \exp(2.5 \cdot C \cdot \gamma(T)) \quad (3.1)$$

ここで、 $\mu_{liq}$  は補正前の液体の粘性、 $C$  は調整定数 (粘性パラメータ)、 $\gamma$  は固相率、 $T$  は温度を表す。

粘性モデルの調整定数  $C = 6.0$  としたときの解析により得られた spreading 流動先端距離の時間進展と実験により得られた測定データの比較を図 3.1-4 に示す。解析は、異なる粒子径 (3 mm、5 mm、10 mm) について実施した。粒子径 5 mm 以下では、概ね粒子径の違いによる解析結果の差は見られず、粒子径に対して解析結果は収束しているといえる。しかし、いずれのケースでも spreading 流動先端は完全な停止には至っていない。このように、従来 MPS 法の解析では、流動先端の粒子の固相率の上昇に伴って粘性が増大しても、後述する「数値的クリープ現象」のため、粒子の速度が適切に粘性により拡散せず、流動停止に至らない。すなわち、従来 MPS 法では spreading の停止位置や条件を予測できないことが分かる。

表 3.1-3 : VULCANO VE-U7 実験の解析条件[11]

パラメータ	溶融物	床材 (セラミック)
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	7,140	5,300
液体の粘性 (Pa·s)	0.0206	—
熱伝導率 (W/m/K)	3.0	4.7
比熱 (J/kg/K)	800	575
固相線温度 (K)	1,273	—
液相線温度 (K)	2,623	—
潜熱 (kJ/kg)	420	—
流入温度 (K)	2,450	—
流入質量 (kg)	14.0	—
流入質量流束 (kg/s)	1.75	—

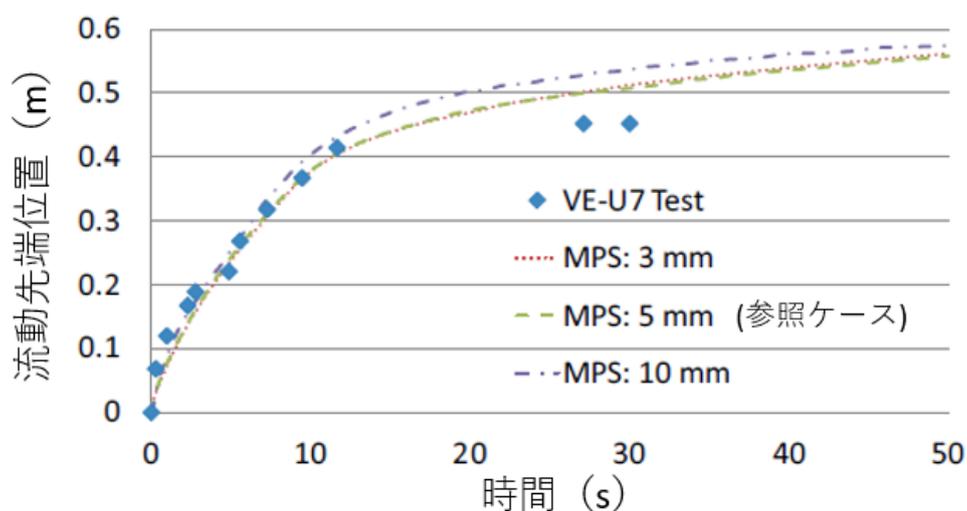


図 3.1-4 : Spreading 流動先端距離の時間進展 (既存 MPS 法、粒子径の影響)

## (2) VULCANO VE-U7 実験の改良 MPS 法による解析

MPS 法により溶融物 spreading の停止位置や条件を予測するために、平成 28 年度に開発したクラスト固着モデルを MPS 法の spreading 解析コードに実装し、VULCANO VE-U7 実験を解析した。クラスト固着モデルでは、実験による報告 [11]を参考に、固化した粒子は床と接触した際に床面に固着し、クラスト層を形成すると仮定した。このとき、粒子の固相率がある値を超えたときに固化したと判定するための固着固相率の閾値 (以下、固着固相率とする) を定める必要がある。

そこで、固着固相率をパラメータに、クラストモデルを実装した改良 MPS 法を用いて、感度解析を実施した。このときの spreading 流動先端距離の時間進展の解析結果と実験により得られた測定データの比較を図 3.1-5 に示す。固着固相率が spreading の流動停止を支配しており、改良

MPS法の解析では最終的に流動先端が完全に停止していることが分かる。特に固着固相率を70%としたケースは測定データと良く一致している。オイラー法に基づく他の手法による同様な流動停止固相率の検討では、MPS法のように、流動先端に形成されるクラストの停止する固相率を厳密には指定することができないが、流動停止時のおよその固相率が推定されている。例えばCORFLOWコードやLAVAコードによる推定ではそれぞれおよそ90%、80%とされている[11]。一方、パイロメーターを用いて実験時に推定された流動停止時の流動先端部の固相率はおおよそ65-75%とされており[10]、改良MPS法の結果は実験的な知見と良く整合している。

以上の結果より、VULCANO VE-U7 spreading 挙動について、次のような理解の深化が得られた。

#### 従来知見

VULCANO VE-U7 spreading は重力/粘性支配の流動であり、溶融物の固相率が閾値を超えると流動は停止する。

#### 理解の深化

VULCANO VE-U7 spreading は重力/粘性支配の流動であり、流動先端に形成されるクラストと流動の固液相互作用の結果、クラストが次第に発達し、やがてバルク流動をせき止めてバルク流動が停止に至る機構が考えられる。従って、従来のオイラー法に基づく手法では考慮することが困難であった、流動先端部の固液相互作用が重要であることが明らかになった。

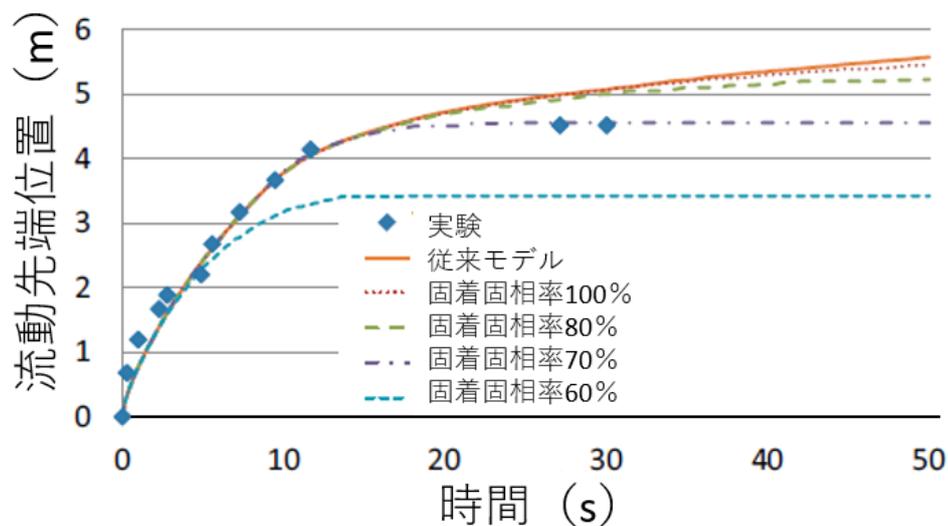


図 3.1-5 : Spreading 流動先端距離の時間進展 (改良 MPS 法)

### 3.1.1.3. 新アルゴリズムによるクラスト破断を伴う spreading の解析 (想定を超える成果)

#### (1) MPS 法の新アルゴリズムの提案

クラスト固着モデルは VULCANO VE-U7 実験のような粘性支配の流動で且つ、固液相変化温度幅が広く、緩やかに流動が停止する現象の予測には有効であることが示されたが、実機事故時の溶融物の状態の不確かさは大きく、慣性力が強く、固液相変化温度幅が狭い溶融物が流動することも考えられる。その場合、クラスト固着によるモデル化が不適切な場合が考えられる。

そこで、従来アルゴリズムの問題点を明確にするために、二次元のタンクに異なる動粘度の液体を入れ、タンクの穴から液体が流出する挙動を比較する仮想的なベンチマーク問題を考えた。流出開始から5秒後の様子を図 3.1-6 に示す。動粘度が増大すれば、同じ口径の穴から流出する液体の量は減るはずだが、従来アルゴリズムを用いた解析ではそのような違いが見られない。

上述の問題とその解決策を図 3.1-7 に示す。従来の MPS 法 [19] は、非圧縮性を担保するために、各タイムステップの最後に圧力項を計算する半陰解法を採用している [9]。一方、溶融物の spreading では、溶融物は温度の低下に伴って粘性が大きくなるため、粘性項を陽的に解くには微小なタイムステップが必要になり、計算コストが膨大になるため [20]、粘性項は図 3.1-7(a) のステップ A2 に示すように陰的に解く必要がある。このとき、粘性が増大に伴い、粒子の暫定速度はほぼゼロになる (ステップ A3)。しかし、次に圧力項を計算する際に、圧力勾配に従って粒子の速度は補正されるが、この補正には粘性項が働かない。すなわち、図 3.1-6 に見られる粒子の運動 (速度) は、圧力項の計算の結果、生じる速度補正が、粘性項の影響を受けずにもたらしている数値的なクリープ現象であるといえる。或いは、非圧縮性を保つための圧力項による速度補正は厳密であるが、粘性項による速度拡散が次のタイムステップに遅れていると理解することもできる。

従って、粘性項による速度の拡散を正確に考慮するにはアルゴリズムの変更が必要である。そこで、図 3.1-7(b) のステップ B5 に示すように、圧力項による速度補正に対しても粘性項による速度拡散を考慮することを考える。しかし、この場合、粘性項を2度解く必要がある。そこで、計算コストの肥大化を避けるため、粒子の位置補正は各タイムステップの最初 (ステップ B1) でのみ行うことを考える。この場合、ステップ B3 とステップ B5 は同じ粒子の位置に対する補正なので、2つのステップを1つにまとめることができる。その結果が、本研究が提案する図 3.1-7(c) に示すアルゴリズムである。この場合、数値的なクリープ現象は生じず、全ての速度に粘性項による拡散が考慮されることになる。一方、圧力項による速度補正は実質的に次のタイムステップに遅れることになる。将来、本手法により溶融物挙動を予測するには実効的で適切なタイムステップを定めることにより、本アルゴリズムが伴うわずかな速度補正の遅れが、溶融物の spreading 解析に影響するほどの誤差はもたらさないことを確認する必要がある。

提案する新アルゴリズムを実装し、先の二次元タンクからの液体流出ベンチマーク解析を実施した。液体流出開始から5秒後の様子を図 3.1-8 に示す。動粘度の増大により穴からの液体の流出が止まっているのが分かる。

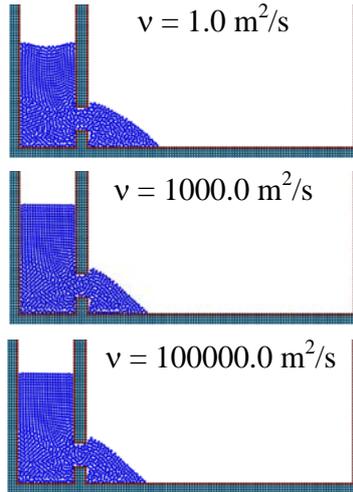


図 3.1-6 : 二次元タンクからの液体流出ベンチマーク (従来アルゴリズム)

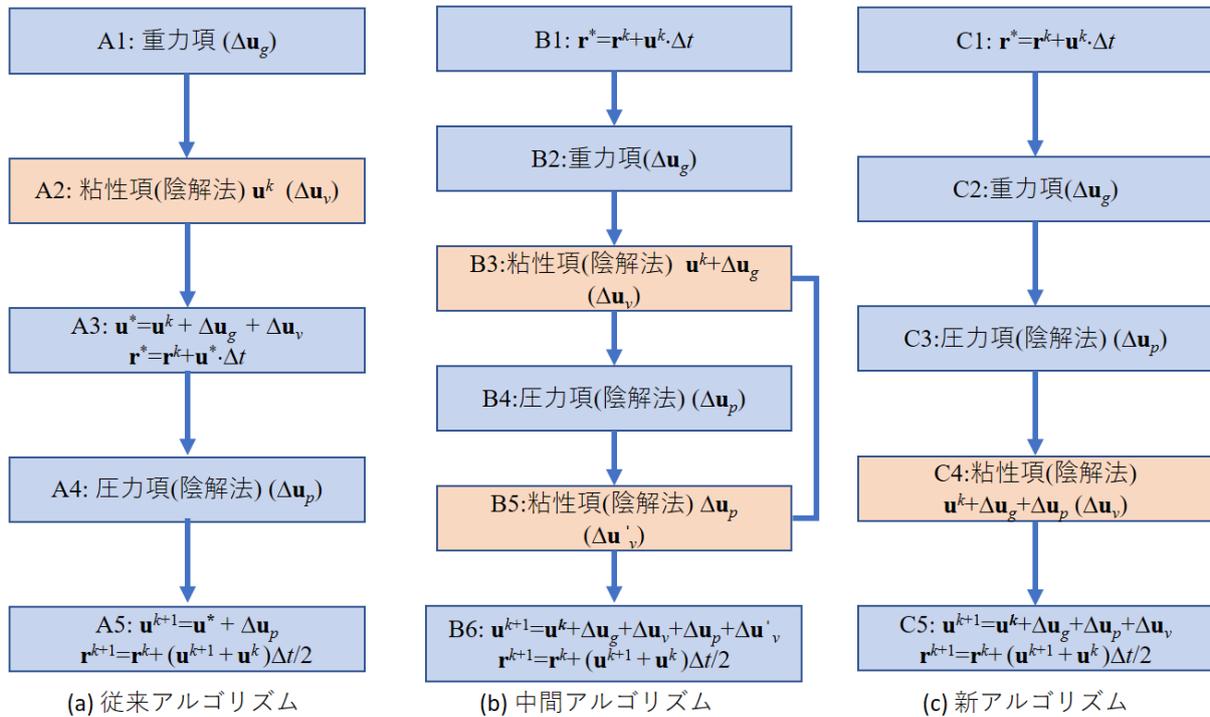


図 3.1-7 : 従来 MPS 法のアルゴリズムとその改良案

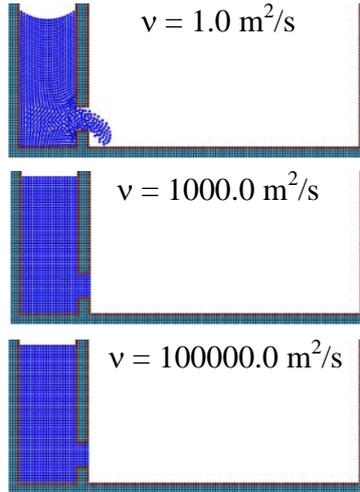


図 3.1-8：二次元タンクからの液体流出ベンチマーク（新アルゴリズム）

## (2) 新アルゴリズムを用いたクラスト破断モデルの提案

新アルゴリズムを用いることにより、クラスト等の個体を超高粘性流体により近似できるようになった。そこで、新アルゴリズムを用いて、剛体の歪に準ずる計算から、実機事故時にも想定される、熔融物とクラストの相互作用の結果、生じるクラストの機械的な破断を以下のように模擬することを提案する。

クラスト等の剛体の歪テンソル $\varepsilon$ は次式で与えられる。

$$\varepsilon_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_{\alpha}}{\partial x_{\beta}} + \frac{\partial u_{\beta}}{\partial x_{\alpha}} \right) \quad (3.2)$$

しかし、ここで求まる歪量は時間と空間に依存して大きく変動することが考えられる。一方、クラストの破断はある瞬間の歪量のみならず、それまでの歪量の履歴にも依存すると考えられる。そこで、先行研究のアプローチ [21]と同様に、以下のように歪量の時間積分を求めることを考える。

$$S_{\alpha\beta} = \int_{-\infty}^t \varepsilon_{\alpha\beta} W(t-t') dt' \quad (3.3)$$

ここで、 $t$ は現在の時刻、 $t'$ は履歴時刻を表す。又、履歴時刻に対して次のような重み関数を考える。

$$W(t-t') = \frac{1}{T} \exp\left(-\frac{t-t'}{T}\right) \quad (3.4)$$

ここで、 $T$ は緩和時間を表す。この結果、歪量の積分値は次のような離散化式で表すことができる。

$$S_{\alpha\beta}^{k+1} = \left(1 - \frac{\Delta t}{T}\right) S_{\alpha\beta}^k + \frac{\Delta t}{T} \varepsilon_{\alpha\beta}^{k+1} \quad (3.5)$$

ここで、 $k$ はタイムステップ番号、 $\Delta t$ はタイムステップ幅を表す。よって、応力テンソルは歪量の積分値を用いて次式で求めることができる。

$$\sigma_{\alpha\beta} = 2\mu S_{\alpha\beta} \quad (3.6)$$

ここで、 $\mu$ は疑似クラストの動粘度を表す。Von Mises の破断理論を用いれば、相当応力は応力テンソルから次式を用いて求めることができる [22] [23]。

$$\sigma_{Mises}^2 = 0.5 \left[ (\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2) \right] \quad (3.7)$$

### (3) クラスト破断モデルを用いた FARO L-26S 実験の解析

FARO L-26S 実験は  $UO_2/ZrO_2$  を質量比で 80/20 で混ぜ合わせた混合溶融物の spreading 実験であり、流動先端に形成されたクラストによる流動の一時停止と、クラスト破断を伴う流動の再開が報告されている [24]。そこで本研究で新たに提案したクラスト破断モデルを MPS 法の spreading 解析コードに実装し、FARO L-26S 実験の spreading の一時停止と再流動機構を検討した。

FARO L-26S 実験に用いられた溶融物は表 3.1-4 に示すように、粘度が低く、固相線温度と液相線温度の差が小さい（融点温度範囲が狭い）ため、ある程度の乱流領域で spreading の流動先端にクラストが形成され、流動の一時停止とクラスト破断による再流動がもたらされた可能性が考えられる。

しかし、あらゆる乱流に起因する渦の全てを数値解析で直接解くことは困難である。そこで、本研究では、小さな渦の影響を模擬する subgrid scale モデルの代表例である Smagorinsky モデル [25] を利用し、以下のように MPS 法の支配方程式である運動量保存則とエネルギー保存則を補正した。

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nabla \cdot ((\nu + \nu_t) \nabla \mathbf{u}) + \mathbf{g} \quad (3.8)$$

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = \nabla \cdot ((k + k_t) \nabla T) + Q \quad (3.9)$$

ここで、 $\nu_t$  と  $k_t$  はそれぞれ乱流粘性と乱流熱伝導率を表し、以下で与えられる。

$$\nu_t = (C_S \Delta)^2 (2S_{\alpha\beta} S_{\alpha\beta})^{1/2} \quad (3.10)$$

$$k_t = \rho C_p \frac{\nu_t}{Pr_t} \quad (3.11)$$

但し、 $S_{\alpha\beta}$  は歪速度を表し、 $C_S$  は乱流係数 (0.06~0.2)、 $Pr_t$  は乱流 Prandtl 数 (1.0) を表す。

MPS 法の二次元解析体系を図 3.1-9 に示す。解析では流入境界粒子を配置し、実験と同様に流入流量 16.5kg/s で 9.7s かけて溶融物が試験部に流入するようにした。体系の溶融物流入部に設置されている collective device (溜まり) には 30.2kg の溶融物が解析開始時から満たされると仮定した。解析に用いる粒子径は 2 mm とした。

例として、乱流係数  $C_S = 0.2$ 、粘性緩和時間  $T = 0.25s$  の場合の解析結果の様子を図 3.1-10 に示す。解析では、溶融物の先端にクラストが形成され、流動が一時的に停止した。その後、後ろからの流動により先端の歪テンソルが増大し、閾値を超えたときにクラスト破断を判定することで、流動が再開した。このとき、再流動した粒子が破断部から勢いよく流動し始めることで、溶融物と床面の間にギャップが形成された。FARO L-26S 実験では、実験後の凝固物と床面の間にギャップ

プが生じていたことが報告されており [24]、本研究の解析結果は、このようなギャップがクラスト形成と破断に伴う流動の一時停止と再流動時に形成された可能性を初めて示したものである。このように、クラスト破断モデルにより、FARO L-26S 実験で観測された、クラスト形成による流動の一時停止と、クラスト破断による再流動を機構論的に示すことに世界で初めて成功し、想定を超える成果が得られた。

表 3.1-4 : FARO L-26S 実験に用いられた溶融物

流入流量 (kg/s)	16.5
初期流入温度 (K)	2,950
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	8,000
熱伝導率 (W/m/K)	3.0
比熱 (kJ/kg/K)	0.5
粘度 (Pas)	0.005
液相線温度 (K)	2,910
固相線温度 (K)	2,860

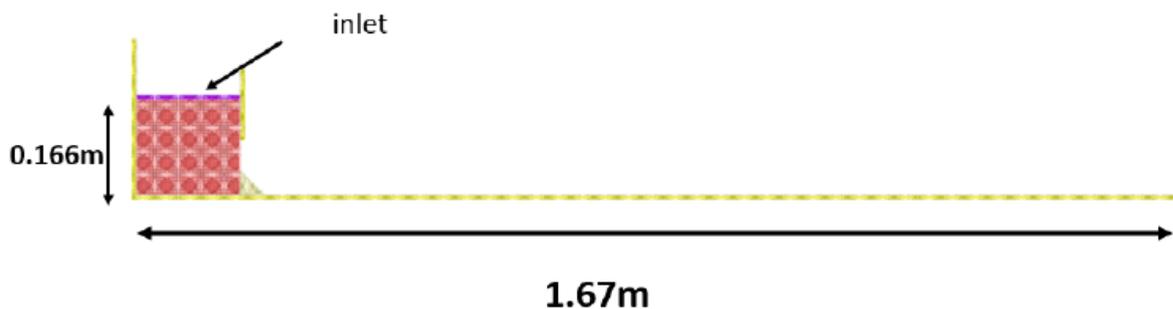


図 3.1-9 : MPS 法による FARO L-26S 実験の二次元解析体系

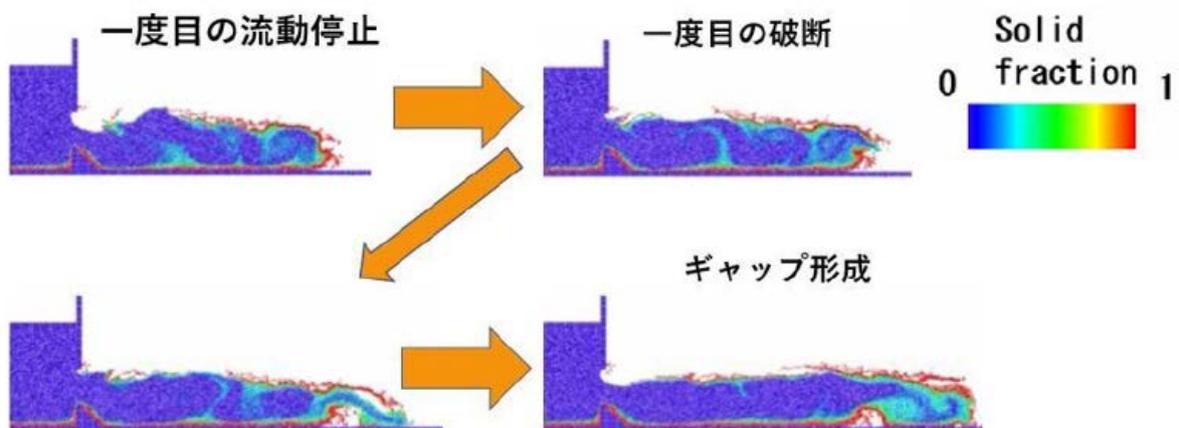


図 3.1-10 : MPS 法による FARO L-26S 実験の解析結果例

### 3.1.2. MPS 法による MCCI 解析モデルの検討と理解の深化

#### 3.1.2.1. 平成 28 年度の実施内容及び成果

##### (1) MCCI 実験マトリックス

これまでに実施された MCCI 実験のうち、初期に実施された TURC [26]、SURC [27] [28]、SWISS [29]、ACE [30]、MACE [31]等は主に一次元実験であり、試験部のコンクリートの下方への浸食のみが熱電対により測定された。これらの実験の概要を表 3.1-5 にまとめる。これらの実験から、石灰岩系コンクリート (LCS, LIM) の MCCI に伴うガスの発生量は珪質岩系 (SIL, BAS) に比べて最大でおよそ 3 倍に達することが確認されている。また、Zr の酸化反応に伴う発熱がコリウムを加熱し、コンクリート浸食率におよぼす影響が大きいことが確認されている。

その後実施された MCCI 実験は二次元体系で実施されており、コンクリートの下方と横方向への浸食率の違いが確認されている。特に、CCI [27]、VULCANO VB [28]、COTELS [29]から、酸化物のコリウムを用いた場合、珪質岩系 (SIL, BAS) のコンクリートは下方向よりも横方向に浸食率が高い非等方性を示す一方で、石灰岩系コンクリート (LCS, LIM) は等方的に浸食されることが明らかになったが、それらの浸食の違いをもたらすメカニズムは未だに解明されていない。近年の主な MCCI 実験の概要を表 3.1-6 にまとめる。

これらの MCCI 実験のうち、VULCANO VB-U7 実験は、それ以前に VULCANO 施設で実施された MCCI 実験の追加・補完的な位置づけを兼ねて実施された。すなわち、酸化物系の模擬コリウムを用いた MCCI 実験で、石灰岩系コンクリートが等方的な浸食パターンが得られ、珪質岩系コンクリートは非等方的な浸食がもたらされることの確認とメカニズム検討のために実施された珪質岩系コンクリートを用いた実験である [17] [35]。そこで、本研究では VULCANO VB-U7 実験を MPS 法による解析の対象として選定した。尚、VULCANO VB-U7 実験の溶融物には酸化物の模擬コリウム (59.0%  $UO_2$ , 30.0%  $ZrO_2$ , 7.0%  $SiO_2$  and 3.0%  $FeO$ ) が用いられた。また、コンクリートには  $Fe_2O_3$  を含む珪質岩系コンクリートが用いられた。

表 3.1-5 : 初期の MCCI 実験の概要

実験名	体系	コリウム	コンクリート	着目パラメータ
MACE	一次元	UO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub> , Zr, Cr	SIL, LIM	冷却性、クラストアンカー
ACE	一次元	UO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub>	SIL, LIM, LCS	崩壊熱、Zr 酸化反応
TURC	一次元	Fe/ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe, or UO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub> , Zr	LCS	過渡試験、コリウム組成
SURC	一次元	Steel with Zr; UO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub> and Zr	SIL, LIM, BAS	Zr-SiO <sub>2</sub> 反応、崩壊熱
WECTOR	一次元	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaO	LCS	上部注水の効果
SWISS	一次元	Stainless steel	LCS	上部注水の効果
BETA	二次元	Fe, Zr, Cr, Ni, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaO	SIL, LCS	崩壊熱の影響

SIL: siliceous、LCS : limestone common sand、LIM: limestone、BAS : basaltic

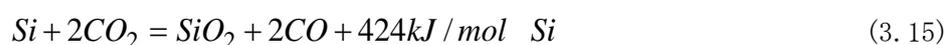
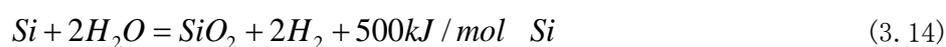
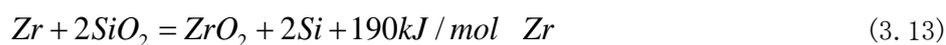
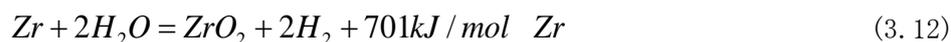
表 3.1-6：近年の主な MCCI 実験

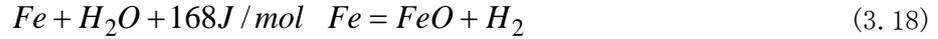
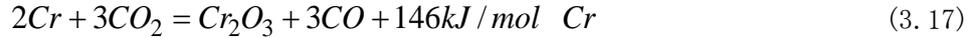
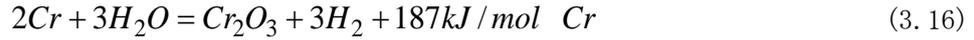
実験名	体系	コリウム	コンクリート	着目パラメータ
CCI	二次元	PWR 模擬コリウム+ コンクリート	LCS, SIL	コンクリート組成、上部注 水の効果
VULCANO VB-U7	二次元	UO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub> , SiO <sub>2</sub>	LCS, SIL	コンクリート組成、コリウ ム組成
COMET-L	二次元	Fe, Ni, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaO	SIL	上部注水、溶融プール成層 化
COTELS	二次元	UO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub> , Zr; Fe	SIL	コンクリート/モルタル flooding
MEK-T1A	一次元	Alumina-thermite	BAS	過渡試験
MOCKA	二次元	Fe, Ni, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaO	LCS, SIL	コンクリート組成、溶融プ ール成層化
HECLA	二次元	ステンレス鋼	SIL	過渡試験

SIL: siliceous、LCS: limestone common sand、LIM: limestone、BAS: basaltic

## (2) VULCANO VB-U7 実験の MPS 法による試解析

MPS 法による spreading 及び MCCI の解析の基本的な部分には共通のサブルーチンが使用できる。尚、コンクリート中の CaCO<sub>3</sub> の分解のような吸熱反応に必要なエネルギーは化学反応熱としては扱わず、コンクリートの相変化時の潜熱として扱うこととした。一方、以下の発熱反応に伴うエネルギーは溶融物中に一様に放出されると仮定した。





VULCANO VB-U7 実験の MPS 法による試解析を実施するために、**図 3.1-11** に示すような体系と条件の計算モデルを構築した。解析は計算コスト低減の観点から実際の体系の 1/2 対象体系としている。また、コンクリート中の粗骨材を非均質にモデル化したケース (Case 1) とコンクリートを均質に扱ったケース (Case2) の解析モデルを構築した。

試解析の結果を**図 3.1-12** に示す。粗骨材を非均質にモデル化した Case 1 ではコンクリートの浸食に伴い、溶融物中に粗骨材が流出していることが分かる。また、解析終了時点のコンクリート断面から、横方向への浸食量が下方向への浸食量よりも大きい結果となり、定性的には実験と同じ浸食パターンが得られた。一方で、粗骨材をモデル化せずにコンクリートを均質に扱った Case2 の解析ではほぼ等方的な浸食パターンが得られ、これも定性的には実験と同様な結果となった。

側壁クラストモデルの有無、及び粗骨材の有無によって、珪質系岩コンクリートの等方・非等方浸食が支配されている可能性が試解析から示された。これらの結果を参考に、平成 29 年度に解析結果の妥当性を定量的に検討することとした。

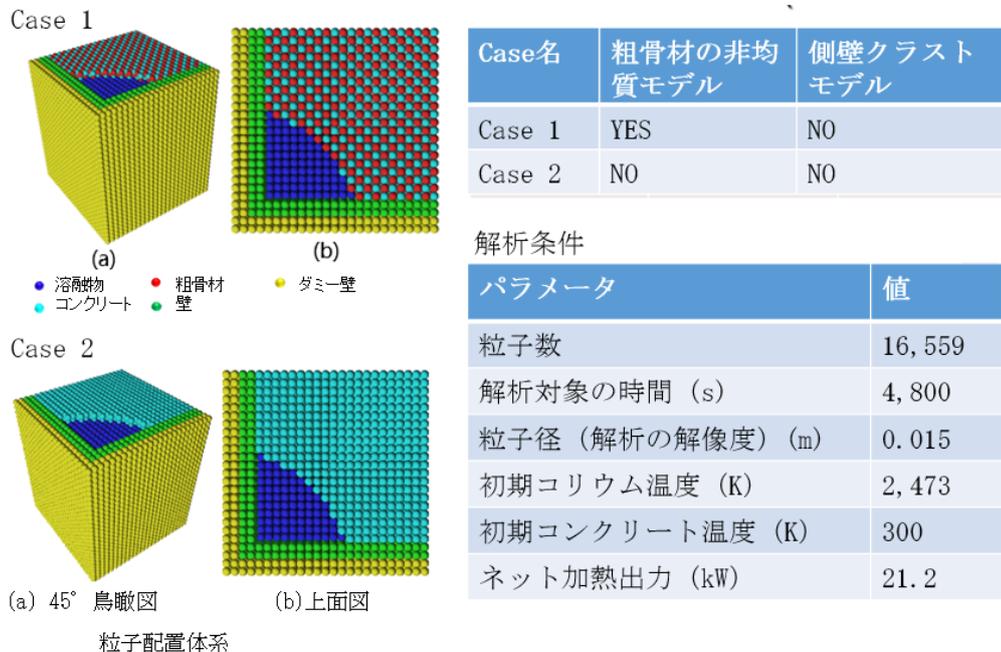
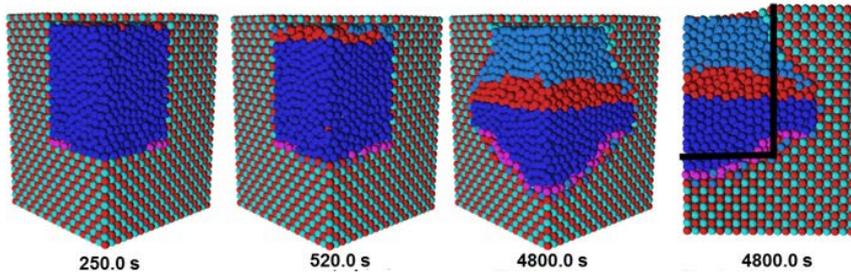


図 3.1-11 : VULCANO VB-U7 実験の MPS 法の解析体系とモデル

Case 1 : 粗骨材あり、側壁クラスト無し



Case 2 : 粗骨材なし、側壁クラスト無し

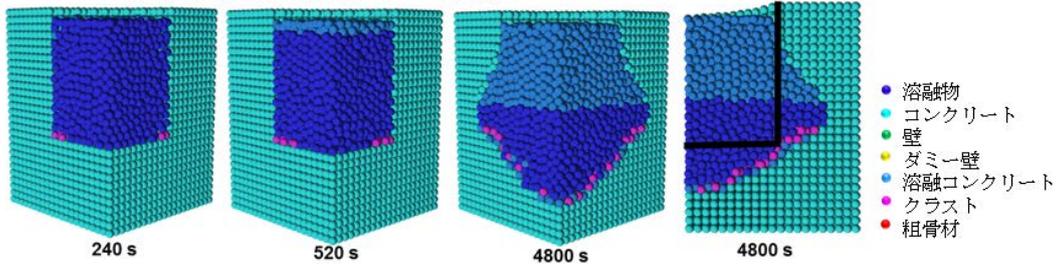


図 3. 1-12 : 粗骨材非均質モデルの有無によるコンクリート等方浸食・非等方浸食の試解析結果

### 3. 1. 2. 2. 平成 29 年度の実施内容及び成果

#### (1) VULCANO VB-U7 実験の改良 MPS 法による解析の条件とモデル

VULCANO VB-U7 実験の解析条件は、公開文献 [35]を参考に平成 28 年度に用いた暫定条件を再検討し、定めた。表 3. 1-7 にまとめる物性値を用いた。ここで、珪質岩系コンクリートと粗骨材の比熱はそれぞれ温度依存性 [36] [37]を考慮した。解析体系とモデルには、平成 28 年度の試解析に用いた体系とモデルの妥当性を検討し、過去の実験レポート等 [17] [35]と照らし合わせ、これらの体系とモデルが妥当であると考えられたことから、平成 29 年度の解析にも同一の体系とモデルを用いることとした。

改良 MPS 法のクラストモデルには、spreading 解析に用いたものと同じクラスト固着モデル（固相率が閾値を超えると壁面に固着すると仮定し、座標を固定するモデル）を用いた。但し、実験部のコンクリート側壁近傍で溶融物が凝固しても、安定したクラストが形成されることは無いという知見 [35]をふまえ、クラストは実験部底部にのみ形成されると仮定した（側壁部に隣接する溶融物が凝固しても座標は固定しない）。

表 3. 1-7 : VULCANO VB-U7 実験の解析に用いる物性値 [35]

	溶融物 (模擬コリウム)	コンクリート	骨材
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	7000.0	2600.0	2650.0
比熱 (J/kg/K)	541.0	温度依存[22]	温度依存 [23]
熱伝導率 (W/m/K)	3.6	1.1	2.5
固相線温度 (K)	1463.0	1413.0	1986.0
液相線温度 (K)	2623.0	1703.0	-
潜熱・分解熱 (kJ/kg)	360.0	188.0	-

## (2) VULCANO VB-U7 実験の改良 MPS 法による解析結果

改良 MPS 法を用いた解析から得られたコンクリート浸食深さの時間進展を、実験により測定されたデータと比較して図 3.1-13 に示す。図中のプロットは測定データ、実線は改良 MPS 法-Case 1 (非均質コンクリートモデル)、破線は改良 MPS 法-Case 2 (均質コンクリートモデル) を表す。又、最終断面形状を図 3.1-14 に示す。これらの比較から、改良 MPS 法の解析では、珪質岩系コンクリートを均質に扱うと、MCCI によるコンクリート浸食パターンが等方的になるが、非均質に扱うと非等方的 (側壁浸食率 > 底部浸食率) となり、コンクリートを非均質に扱うことで実験データと良く一致することが分かる。

代表的な時刻における温度分布の計算結果を、特に Case 1 で安定クラストが形成される時刻 700s 以降に着目して図 3.1-15 に示す。両ケースの温度分布は Case 1 で実験部底部に安定クラストが形成される時刻 700s まではほぼ同じであるが、それ以降は異なる。すなわち、Case 1 の実験部底部のコンクリートと溶融物の界面温度は Case 2 のそれに比べて低い。これは、コンクリートに比べて熱伝導率が高い安定粗骨材がヒートシンクの役割を果たし、実験部底部に形成されるクラストを安定化した結果、安定クラストの断熱効果をもたらされたためと考えられる。その結果、実験部側壁部に比べて底部への溶融物からコンクリートへの界面熱伝達量が低下し、側壁部が底部に比べて大きく浸食する非等方浸食パターンをもたらされたと考えられる。

以上の結果より、VULCANO VB-U7 MCCI 実験について、次のような理解の深化が得られた。

### 従来知見

VULCANO VB-U7 実験では珪質岩系コンクリートが用いられているため、溶融物からコンクリートへの熱流束の縦横比を調整し、非等方浸食をもたらされることを模擬して解析する。

### 理解の深化

MCCI の溶融物・クラスト相互作用の違いが等方浸食/非等方浸食の違いをもたらす機構が考えられる。特に、VULCANO VB-U7 実験のように珪質岩系コンクリートを用いる場合、熱的に安定な粗骨材のリロケーションが側壁クラスト形成を阻害する一方で、底部ではヒートシンクの役割を果たし、クラストを安定化させ、底部の浸食を抑制することで非等方浸食をもたらす機構が考えられる。

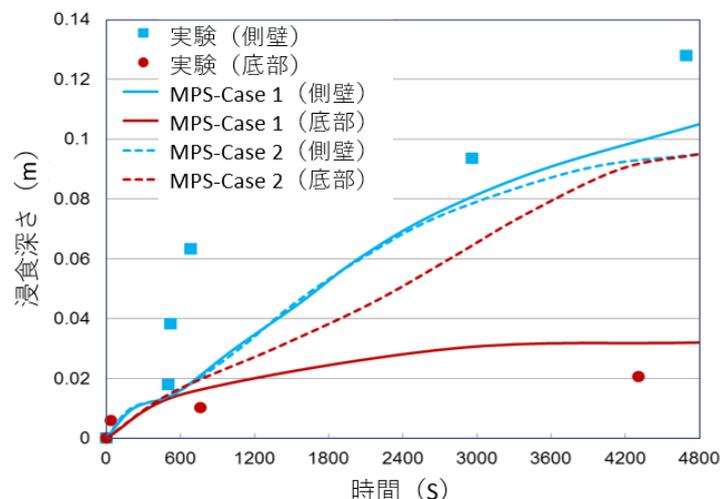


図 3.1-13 : VULCANO VB-U7 実験のコンクリート浸食深さの比較

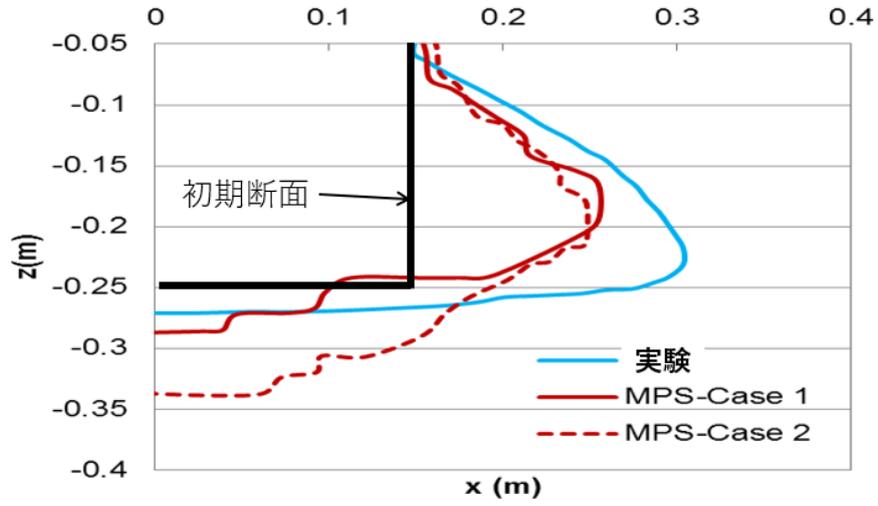
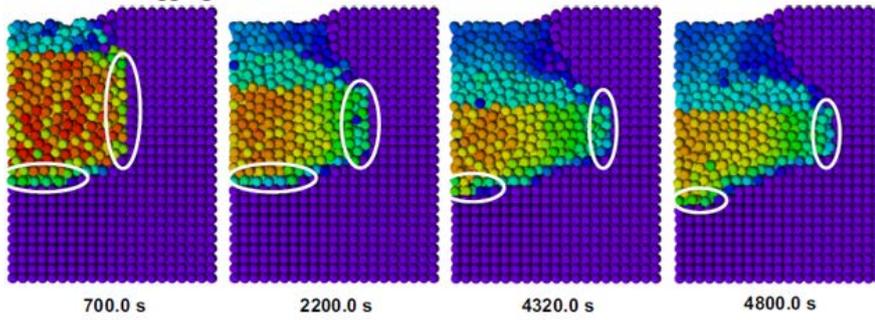


図 3.1-14 : VULCANO VB-U7 実験のコンクリート浸食後の最終断面形状の比較

Case 1 : 粗骨材あり (非均質)



Case 1 : 粗骨材なし (均質)

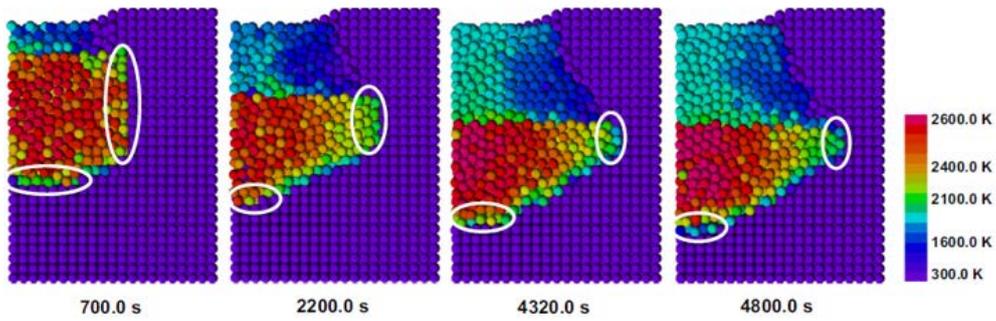


図 3.1-15 : 改良 MPS 法による解析結果 (温度分布)

### 3.1.3. 数学による離散化手法の検討

#### 3.1.3.1. 平成 28 年度の実施内容及び成果

##### (1) はじめに

近年、構造保存型数値解法あるいは幾何学的数値積分法と呼ばれる手法の研究が盛んになってきている [38] [39]。これは微分方程式がもつ何らかの数学的構造を離散化後も保持することによって、微分方程式の解の定性的挙動を忠実に再現するような近似解を得ることを目指す数値計算法である。正準 Hamilton 系の symplectic 構造を保存する symplectic 法が代表的な例であるが、降旗・森 [40]によって保存系のみならず散逸系の偏微分方程式にも適用可能な離散変分導関数法と呼ばれる手法が提案された。これは微分方程式がある汎関数に作用する歪対称作用素と負定値対称作用素で表される場合、その構造を保存するように離散化を行うことによって、汎関数の（歪対称作用素に起因する）保存性と（負定値対称作用素に起因する）散逸性を常に保証する数値解法を構築するものである。

一方、非圧縮流れを記述する渦度方程式は非粘性の場合 Poisson 構造をもつことが知られている [41]。また保存系の Poisson 構造に負定値対称の二次形式を組み合わせることによって散逸系を記述する試みも行われている [42] [43]。平成 28 年度はこれらの概念を用いて二次元渦度方程式を歪対称の Poisson 括弧と半負定値対称の散逸括弧により定式化し、それに上記の離散変分導関数法を適用して運動エネルギーとエンストロフィーが非粘性の時には正確に保存し、粘性がある時には適切に散逸する計算手法を開発し、それを三次元に拡張した。なお三次元への拡張にあたり三次元 Euclid 空間の de Rham 複体 [44]の構造を格子上で保存するような離散化手法を開発した。これは Mimetic Finite Difference 法 [45]等として研究されているものと同様であるが、その基本的な概念は数値流体力学の研究者に認識されていたものである [46]。これにより、渦度場の速度場との関係と非発散条件が自動的に離散系に引き継がれると同時に、離散化した渦度方程式を速度と圧力を未知数とする離散 Navier-Stokes 方程式に帰着させることが可能になる。

すなわち、数学による離散化手法の検討の第一歩として、平成 28 年度は三次元非圧縮流れに対して運動エネルギー等の各種保存量が正確に保存する構造保存型数値解法の計算アルゴリズムを考案した。

##### (2) Poisson 括弧と散逸括弧による三次元渦度方程式の定式化と離散化

平成 28 年度は三次元非圧縮流れに対して運動エネルギー等の各種保存量が正確に保存する構造保存型数値解法の計算アルゴリズムを考案した。具体的には、Poisson 括弧及び散逸括弧をそれぞれ以下に示す (3.20) 式及び (3.21) 式で定義した。

$$\{F, G\} = \left\langle (\nabla^* \times)_{\text{FE}} \frac{\delta F}{\delta \tilde{\omega}}, \left[ (\nabla^* \times)_{\text{FE}} \frac{\delta G}{\delta \tilde{\omega}} \right] \times [\mu_{\text{FE}}^* (m_t \tilde{\omega})^{n+1/2}] \right\rangle_{\text{EDGE}} \quad (3.20)$$

$$[F, G] = -\nu \left\langle (\nabla^* \times)_{\text{FE}} \frac{\delta F}{\delta \tilde{\omega}}, (\nabla^* \times)_{\text{FE}} \frac{\delta G}{\delta \tilde{\omega}} \right\rangle_{\text{EDGE}} \quad (3.21)$$

ここで  $F$  と  $G$  は任意の離散汎関数であり  $\delta F / \delta \tilde{\omega}, \delta G / \delta \tilde{\omega}$  は離散渦度  $\tilde{\omega}$  に関する離散汎関数微分である。 $\mu_{\text{FE}}^*$  と  $m_t$  はそれぞれ空間と時間に関する補間作用素、 $\langle \cdot, \cdot \rangle_{\text{EDGE}}$  は（格子辺：EDGE に定義される変数に対する）内積を表す。 $\nu$  は動粘度である。そのとき汎関数の時間差分は

エネルギー  $H$  とエンストロフィー  $Z$  を用いて  $\Delta F/\Delta t = \{F, H\} + [F, Z]$  と表される。離散勾配作用素、離散回転作用素、離散発散作用素をそれぞれ (3.22) 式、(3.23)–(3.24) 式、(3.25)–(3.26) 式のように定義し、(3.27) 式のようにエネルギー、ヘリシティ、エンストロフィーを離散化することによって、非圧縮流れを近似する離散化方程式 ((3.28) 式及び(3.29) 式) を導出することに成功した。

$$(\nabla_{\text{GE}} \phi)_I^i = (\delta_i \phi)_I, \quad (\nabla_{\text{CF}}^* \Phi)_I^i = (\delta_i^* \Phi)_I \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3.22)$$

$$[(\nabla \times)_{\text{EF}} u]_I^i = \sum_{j,k=1}^3 \epsilon_{ijk} (\delta_j u^k)_I, \quad (3.23)$$

$$[(\nabla^* \times)_{\text{FE}} \xi]_I^i = \sum_{j,k=1}^3 \epsilon_{ijk} (\delta_j^* \xi^k)_I \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3.24)$$

$$[(\nabla \cdot)_{\text{FC}} \xi]_I = (\delta_1 \xi^1)_I + (\delta_2 \xi^2)_I + (\delta_3 \xi^3)_I, \quad (3.25)$$

$$[(\nabla^* \cdot)_{\text{EG}} u]_I = (\delta_1^* u^1)_I + (\delta_2^* u^2)_I + (\delta_3^* u^3)_I \quad (3.26)$$

$$H(\tilde{\psi}^n) = \frac{1}{2} \langle (\nabla^* \times)_{\text{FE}} \tilde{\psi}^n, (\nabla^* \times)_{\text{FE}} \tilde{\psi}^n \rangle_{\text{EDGE}},$$

$$S(\tilde{\psi}^n) = \frac{1}{2} \langle \mu_{\text{EF}} \tilde{v}^n, (\nabla \times)_{\text{EF}} \tilde{v}^n \rangle_{\text{FACE}}, \quad (3.27)$$

$$Z(\tilde{\psi}^n) = \frac{1}{2} \langle \tilde{\omega}^n, \tilde{\omega}^n \rangle_{\text{FACE}}$$

$$(\delta_t \tilde{v})^{n+1/2} = (m_t \tilde{v})^{n+1/2} \times \mu_{\text{FE}}^* (m_t \tilde{\omega})^{n+1/2} - v \tilde{\Delta}_{\text{EE}} (m_t \tilde{v})^{n+1/2} - \tilde{\nabla}_{\text{GE}} \phi^{n+1} \quad (3.28)$$

$$(\tilde{\nabla}^* \cdot)_{\text{EG}} \tilde{v}^{n+1} = 0 \quad (3.29)$$

ここで  $\tilde{\psi}, \tilde{v} = (\nabla^* \times)_{\text{FE}} \tilde{\psi}, \tilde{\omega} = (\nabla \times)_{\text{EF}} \tilde{v}$  はそれぞれ離散化した流れ関数、速度、渦度であり、 $\tilde{\psi}$  と  $\tilde{\omega}$  は格子面 : FACE に、 $\tilde{v}$  は格子辺 : EDGE に定義される。

### 3.1.3.2. 平成 29 年度の実施内容及び成果

#### 周期渦列の崩壊過程のベンチマーク解析

平成 28 年度に示した構造保存型数値解法に対して、平成 29 年度は具体的な数値計算アルゴリズムをまずはメッシュ法をベースに開発し、それに基づいて計算コードを作成した。更に同コードを用いて、粘性の小さな溶融炉心の spreading におけるような、乱れた流動の解析能力を評価するために、周期渦列の崩壊過程のベンチマーク解析を実施し、開発した構造保存型数値解法の有効性を検証した。

直方体領域  $[-1,1] \times [-1,1] \times [0,1]$  内の周期渦列

$$v^1(x, y, z) = \frac{1}{2} \cos(\pi x) \cos(\pi y), \quad (3.30)$$

$$v^2(x, y, z) = \frac{1}{2} \sin(\pi x) \sin(\pi y),$$

$$v^3(x, y, z) = \cos(\pi x) \sin(\pi y)$$

を考える。この  $z$  方向渦度の分布と速度分布はそれぞれ図 3.1-16、図 3.1-17 に示す通りである。

(3.30) 式は非粘性渦度方程式の定常解であり、これを初期値とした粘性渦度方程式の解は

$$\begin{aligned}\omega^1(t, x, y, z) &= \pi \cos(\pi x) \cos(\pi y) e^{-2\pi^2 vt}, \\ \omega^2(t, x, y, z) &= \pi \sin(\pi x) \sin(\pi y) e^{-2\pi^2 vt}, \\ \omega^3(t, x, y, z) &= \pi \cos(\pi x) \sin(\pi y) e^{-2\pi^2 vt}\end{aligned}\tag{3.31}$$

と表される。これらの解は不安定であり、(3.30)式に大きさ  $10^{-4}$  の  $z$  方向速度の攪乱を加えたものを初期値として渦の崩壊過程を計算した。格子分割は  $40 \times 40 \times 20 = 32000$  とした。

非粘性 ( $\nu = 0$ ) の場合の計算結果を図 3.1-18 と図 3.1-19 に示す。図 3.1-18 は  $z$  方向渦度の時間変化で、それを見ると  $t = 20$  前後で渦列が崩壊し、 $t = 40$  には格子が解像できる限界まで渦が細分化していることが分かる。

そのような状況下でも図 3.1-19 の (a) と (b) に示したように運動エネルギーとヘリシティは非常に良い精度で保存していることが確認される。エンストロフィーは図 3.1-19 (c) に示す通り渦列が崩壊すると急激に増大するが、 $t = 30 \sim 40$  あたりで頭打ちとなり、その後はほぼ一定の値をとるようになる。図 3.1-19 (c) にはエンストロフィーの離散収支式の生成消滅項を示した。非粘性であるので粘性散逸項は常に 0 であり、渦伸長項が上述のエンストロフィー増大の原因となっている。すなわち、渦列が崩壊すると渦伸長効果によって渦のスケールが小さくなり渦の強度が増大するが、格子が解像できる限界まで渦が小さくなると渦伸長効果が抑えられると考えられる。以上により、微小攪乱を導入することによって周期渦列を崩壊させ、そのような乱れた流れ場でも運動エネルギー等の保存量が精密に保存することを確認し、エンストロフィーが増加しても、エネルギーは減衰せず（保存し）、ヘリシティも保存していることを確かめた。

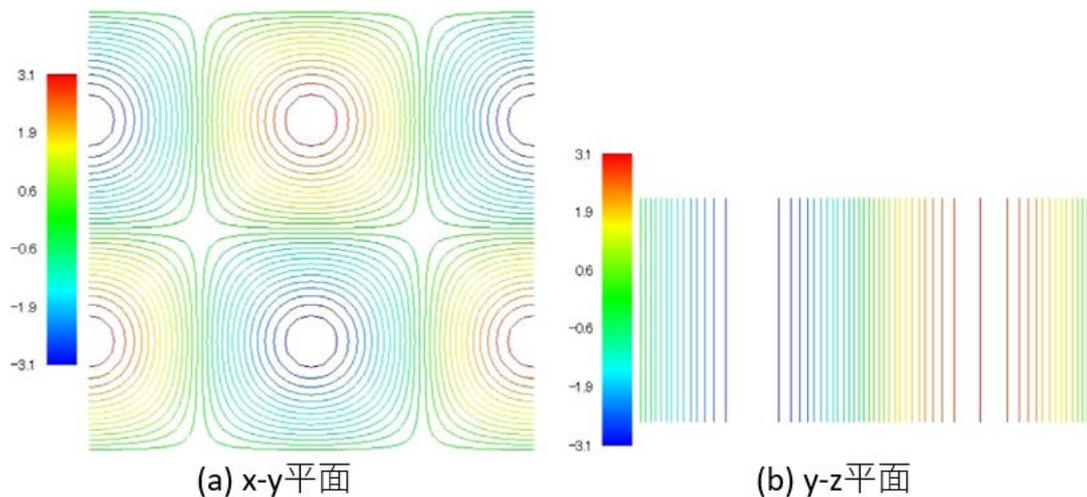


図 3.1-16 : 周期渦列の崩壊過程のベンチマークの  $z$  方向渦度の初期分布 (メッシュ法)

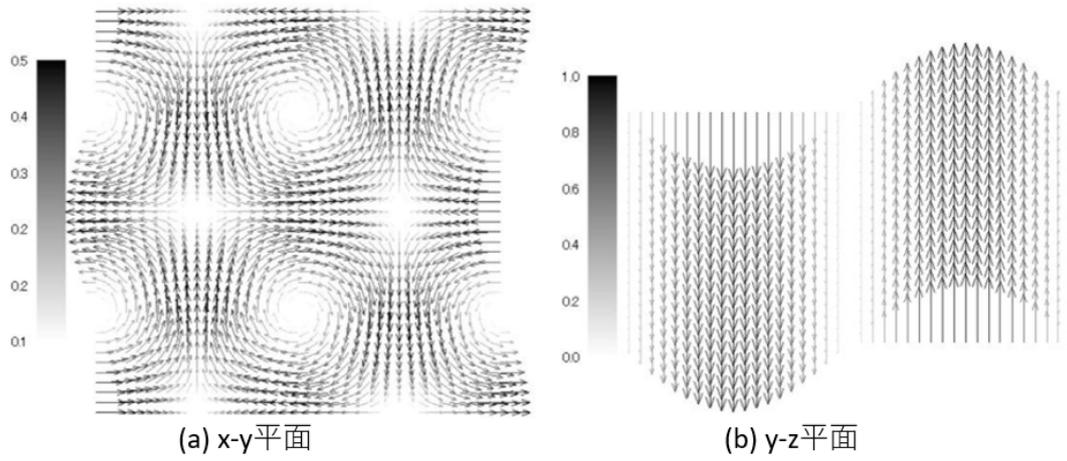


図 3.1-17：周期渦列の崩壊過程のベンチマークの初期速度ベクトル図（メッシュ法）

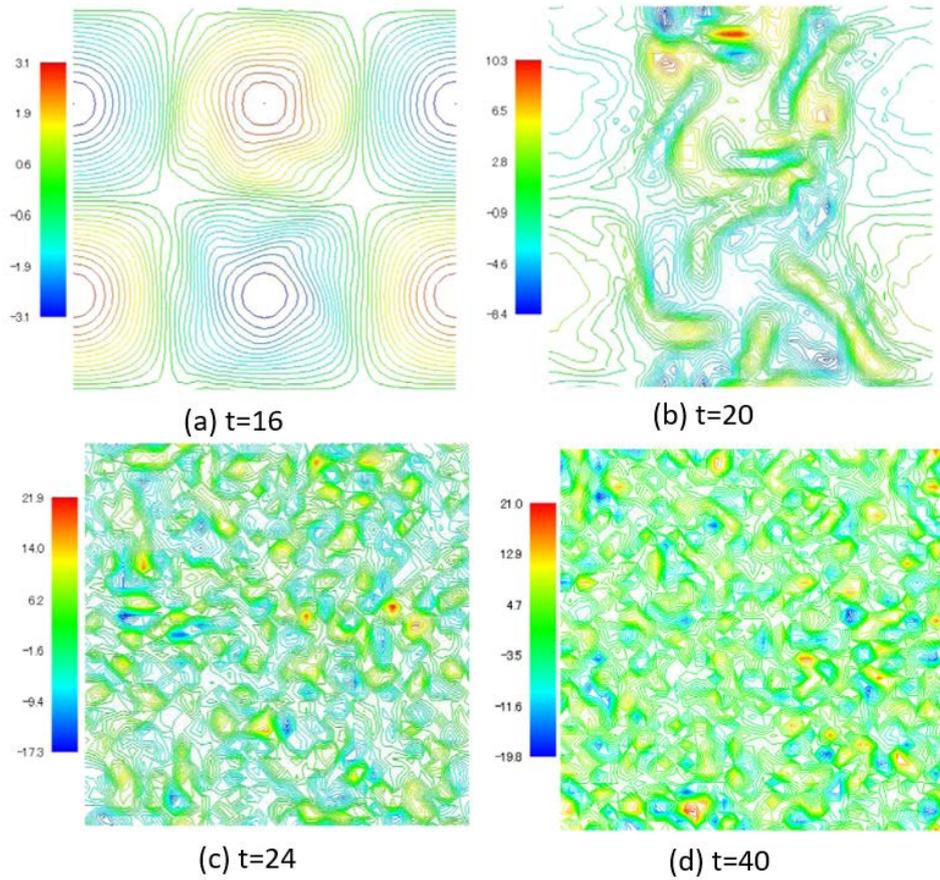


図 3.1-18：周期渦列の崩壊過程のベンチマークのz方向渦度の分布（メッシュ法）

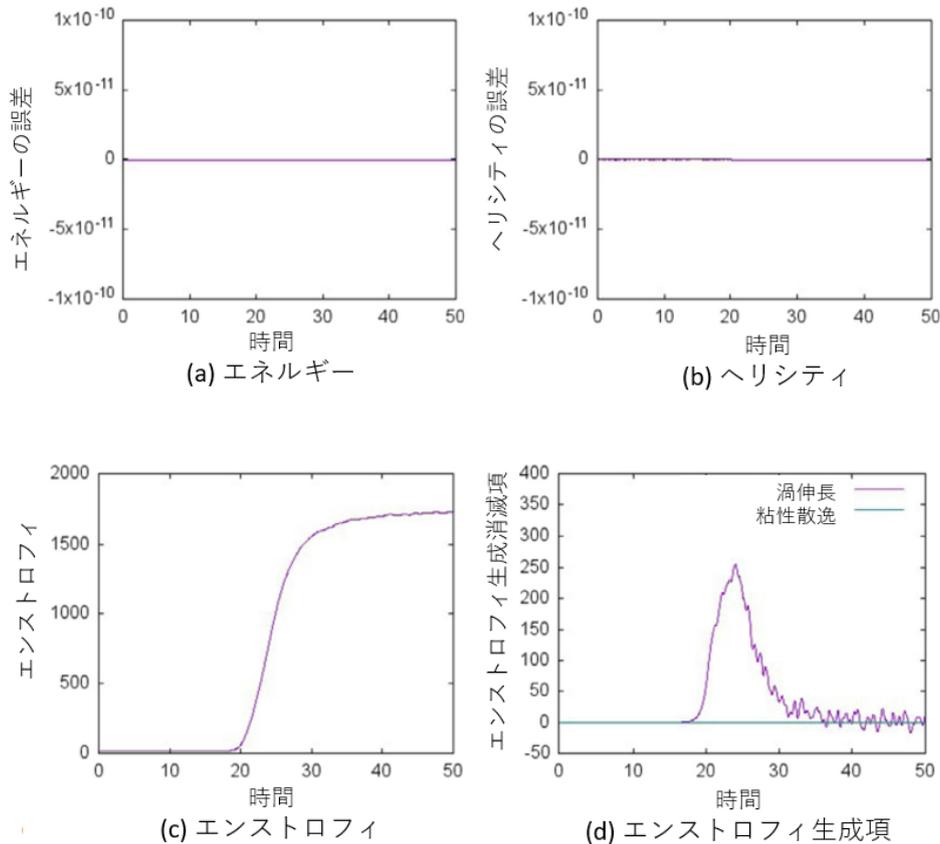


図 3.1-19 : エネルギー、ヘリシティ、エンストロフィの計算結果 (メッシュ法)

### 3.1.3.3. 平成 30 年度の実施内容及び成果

#### (1) 周期渦列の崩壊過程のベンチマーク解析

平成 29 年度に開発したメッシュ法による構造保存型数値解法に対して行ったベンチマーク解析の知見を活用し、Hamilton 力学的定式化による MPS 法 (HMPS 法) に対しても同様なベンチマーク解析を実施した。解析は二次元体系で行った。初期条件の速度分布は (3.32) 式で与えた。

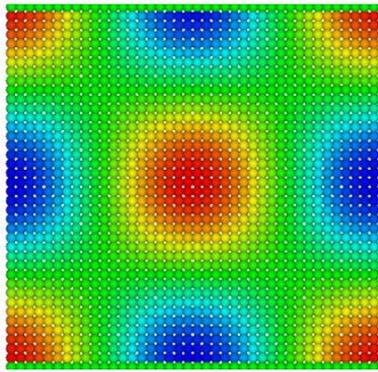
$$\begin{aligned}
 u &= \cos 2\pi x \cos 2\pi y \\
 v &= \sin 2\pi x \sin 2\pi y
 \end{aligned}
 \tag{3.32}$$

このときの規格化した速度分布を図 3.1-20 に示す。また、速度ベクトル図を図 3.1-21 に示す。

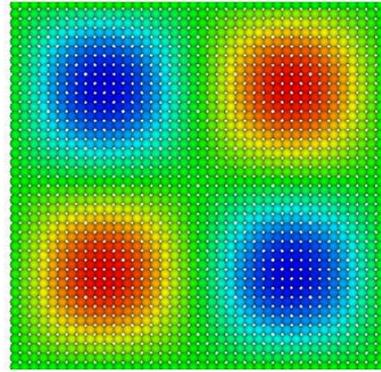
非粘性 ( $\nu = 0$ ) の場合の計算結果を図 3.1-22 と図 3.1-23 に示す。図 3.1-22 を見るとメッシュ法による解析結果 (図 3.1-18) と同様に時間の経過とともに渦が崩壊していることが分かる。そのような乱れた流れ場でも (運動) エネルギーは保存している (図 3.1-23(a))。

一方で、HMPS 法の解析結果は、メッシュ法の解析結果とは異なり、ヘリシティの保存性が無いことを示している (図 3.1-23(b))。すなわち、速度勾配に依存する量の保存性が無い。これは、HMPS 法の定式化に速度勾配テンソルを組み込むことが困難なことに起因している。この問題の解決には例えば以下のような改良の検討が有効と考えられる (本事業では 1 つ目を検討する) :

- 速度勾配テンソルを未知数とする定式化 (本事業で検討)
- 速度勾配テンソルの高次精度離散化



(a)  $x$ 方向速度分布



(b)  $y$ 方向速度分布

図 3.1-20 : 周期渦列の崩壊過程のベンチマークの初期速度分布 (MPS 法)

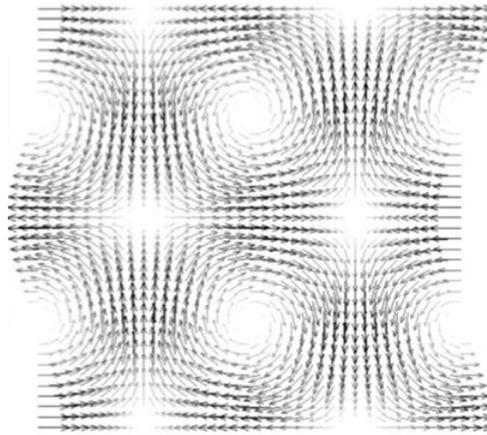
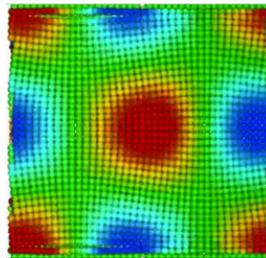
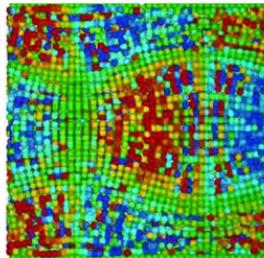


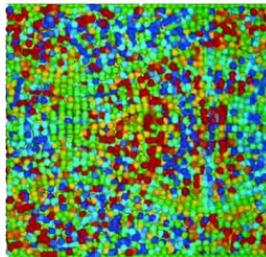
図 3.1-21 : 周期渦列の崩壊過程のベンチマークの初期速度ベクトル図 (MPS 法)



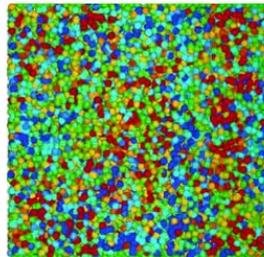
(a)  $t=0.02$



(b)  $t=0.04$

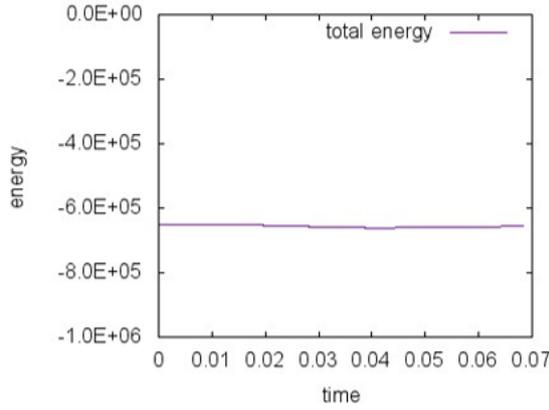


(c)  $t=0.05$

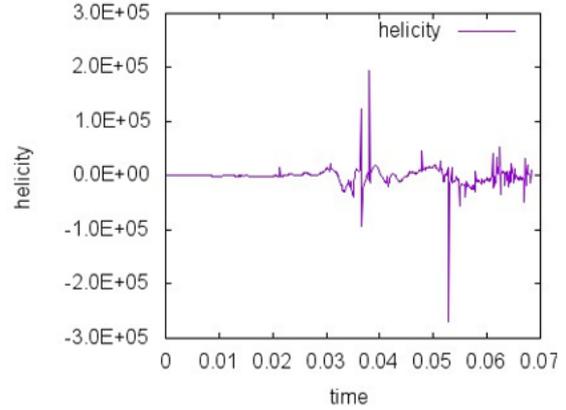


(c)  $t=0.07$

図 3.1-22 : 周期渦列の崩壊過程のベンチマークの $z$ 方向渦度の分布 (MPS 法)



(a) エネルギー



(b) ヘリシティ

図 3.1-23 : エネルギーとヘリシティの計算結果 (MPS 法)

## (2) 速度勾配テンソルを未知関数とする定式化の検討

構造保存型の粒子法を開発するための第一歩として、速度勾配テンソルを未知関数とする定式化の検討を行った。その中で基礎方程式を同定し、エネルギー保存則を確認した。また基礎方程式を平成 29 年度までに開発した構造保存型数値解法と同じ形式になるように Poisson 括弧と散逸括弧によって定式化した。これを基礎として平成 29 年度までに開発した手法を応用することによって構造保存型数値解法を開発することが考えられる。さらに基礎方程式を変分原理に基づいて定式化した。これは HMPS 法で用いている定式化と同じ形であり、これに基づいて粒子法を開発することも考えられる。

### (2-1) 基礎方程式

まず Lagrange 座標上のエネルギー関数を

$$\mathcal{U}(m, F) = \frac{|m|^2}{2\rho_0} + \rho_0 \widehat{W}(F) = \frac{1}{2\rho_0} m_k \delta^{kl} m_l + \rho_0 W(F^T F) \quad (3.33)$$

とする。ここで  $m$  は運動量ベクトル、 $F$  は変形勾配テンソル、 $\rho_0$  は密度である。そのとき、次の形の基礎方程式を考える。

$$\begin{aligned} \frac{dm_i}{dt} &= \frac{\partial \mathcal{U}_{F_1^i}}{\partial X^I}, \\ \frac{dF_1^i}{dt} &= \frac{\partial \mathcal{U}_{m_i}}{\partial X^I} - \lambda \mathcal{U}_{F_1^i} \end{aligned} \quad (3.34)$$

ここで  $t$  は時間、 $X$  は Lagrange 座標 (参照座標) である。第一式は運動方程式であり、第二式は速度勾配テンソルによるエネルギーの減衰 (すなわち粘性) を表す。

### (2-2) エネルギー保存則

(3.34) 式より

$$\begin{aligned} \frac{d\mathcal{U}}{dt} &= u_{m_i} \frac{dm_i}{dt} + u_{F_1^i} \frac{dF_1^i}{dt} = u_{m_i} \frac{\partial \mathcal{U}_{F_1^i}}{\partial X^I} + u_{F_1^i} \frac{\partial \mathcal{U}_{m_i}}{\partial X^I} - u_{F_1^i} \lambda \mathcal{U}_{F_1^i} \\ &= \frac{\partial}{\partial X^I} (u_{m_i} u_{F_1^i}) - \lambda u_{F_1^i} u_{F_1^i} \end{aligned} \quad (3.35)$$

であるから、

$$\frac{d\mathcal{U}}{dt} + \frac{\partial}{\partial X^I} (-\mathcal{U}_{m_i} \mathcal{U}_{F^i}) = -\lambda \mathcal{U}_{F^i} \mathcal{U}_{F^i} \leq 0 \quad (3.36)$$

が成り立つ。これは係数  $\lambda$  をもつ項によってエネルギーが減衰することを表している。

### (2-3) Poisson 括弧と散逸括弧による定式化

Poisson 括弧と散逸括弧により定式化することにより、平成 29 年度までに開発した構造保存型数値解法を適用できる可能性が考えられる。Hamiltonian 汎関数を

$$\mathcal{H}(m, F) = \int_{\Omega} \mathcal{U}(m, F) dX \quad (3.37)$$

と定義すると

$$\begin{aligned} \delta \mathcal{H}(m, F; \delta m, \delta F) &= \frac{d}{d\epsilon} \int_{\Omega} \mathcal{U}(m + \epsilon \delta m, F + \epsilon \delta F) dX \Big|_{\epsilon=0} \\ &= \int_{\Omega} \left[ \mathcal{U}_{m_j}(m, F) \delta m_j + \mathcal{U}_{F^j}(m, F) \delta F_j^j \right] dX \end{aligned} \quad (3.38)$$

より

$$\frac{\delta \mathcal{H}}{\delta m_j} = \mathcal{U}_{m_j}, \quad \frac{\delta \mathcal{H}}{\delta F_j^j} = \mathcal{U}_{F_j^j} \quad (3.39)$$

である。歪対称の Poisson 括弧を任意の汎関数  $\mathcal{F}, \mathcal{G}$  に対して

$$\{\mathcal{F}, \mathcal{G}\} = \int_{\Omega} \left( \frac{\delta \mathcal{F}}{\delta m_i} \frac{\partial}{\partial X^I} \frac{\delta \mathcal{G}}{\delta F_i^I} - \frac{\delta \mathcal{G}}{\delta m_i} \frac{\partial}{\partial X^I} \frac{\delta \mathcal{F}}{\delta F_i^I} \right) dX \quad (3.40)$$

と定義すると、任意の  $\mathcal{F}$  に対して

$$\frac{d\mathcal{F}}{dt} = \{\mathcal{F}, \mathcal{H}\} \quad (3.41)$$

が成り立つことと運動方程式：(3.34) 式（ただし  $\lambda = 0$ ）が成り立つことは同値となる。実際、任意の  $\xi$  と  $\Xi$  を用いて汎関数  $\mathcal{F}: \mathfrak{X} \rightarrow \mathbb{R}$  を

$$\mathcal{F}(m, F) = \int_{\Omega} (m_i \xi^i + F_i^I \Xi_i^I) dX \quad (3.42)$$

とすると

$$\frac{\delta \mathcal{F}}{\delta m_i} = \xi^i, \quad \frac{\delta \mathcal{F}}{\delta F_i^I} = \Xi_i^I \quad (3.43)$$

であるから、その場合 (3.41) 式は

$$\begin{aligned} \frac{d\mathcal{F}}{dt} - \{\mathcal{F}, \mathcal{H}\} &= \int_{\Omega} \left( \frac{dm_i}{dt} \xi^i + \frac{dF_i^I}{dt} \Xi_i^I \right) dX - \int_{\Omega} \left( \xi^i \frac{\partial}{\partial X^I} \mathcal{U}_{F_i^I} - \mathcal{U}_{m_i} \frac{\partial}{\partial X^I} \Xi_i^I \right) dX \\ &= \int_{\Omega} \left[ \xi^i \left( \frac{dm_i}{dt} - \frac{\partial \mathcal{U}_{F_i^I}}{\partial X^I} \right) + \Xi_i^I \left( \frac{dF_i^I}{dt} - \frac{\partial \mathcal{U}_{m_i}}{\partial X^I} \right) \right] dX + \int_{\partial \Omega} \mathcal{U}_{m_i} \Xi_i^I N_I dA = 0 \end{aligned} \quad (3.44)$$

と表せる。これが任意の  $\xi$  と  $\Xi$  に対して成り立つことから

$$\frac{dm_i}{dt} = \frac{\partial \mathcal{U}_{F_i^i}}{\partial X^I}, \quad \frac{dF_i^i}{dt} = \frac{\partial \mathcal{U}_{m_i}}{\partial X^I} \quad (3.45)$$

が得られる。

また対称半負定値の散逸括弧を

$$[\mathcal{F}, \mathcal{G}] = -\lambda \int_{\Omega} \frac{\delta \mathcal{F}}{\delta F_i^i} \delta^{ij} \delta_{IJ} \frac{\delta \mathcal{G}}{\delta F_j^j} dX \quad (3.46)$$

と定義すると、任意の汎関数  $\mathcal{F} = \mathcal{F}(x, m)$  の時間発展は

$$\frac{d\mathcal{F}}{dt} = \{\mathcal{F}, \mathcal{H}\} + [\mathcal{F}, \mathcal{H}] \quad (3.47)$$

と表される。ここで、(3.42) 式の形の汎関数を考えると

$$[\mathcal{F}, \mathcal{H}] = -\lambda \int_{\Omega} \frac{\delta \mathcal{F}}{\delta F_i^i} \delta^{ij} \delta_{IJ} \frac{\delta \mathcal{H}}{\delta F_j^j} dX = -\lambda \int_{\Omega} \Xi_i^i \delta^{ij} \delta_{IJ} \mathcal{U}_{F_j^j} dX \quad (3.48)$$

であるから、その場合 (3.47) 式は

$$\begin{aligned} \frac{d\mathcal{F}}{dt} - \{\mathcal{F}, \mathcal{H}\} - [\mathcal{F}, \mathcal{H}] \\ &= \int_{\Omega} \left( \frac{dm_i}{dt} \xi^i + \frac{dF_i^i}{dt} \Xi_i^i \right) dX - \int_{\Omega} \left( \xi^i \frac{\partial \mathcal{U}_{F_i^i}}{\partial X^I} - \mathcal{U}_{m_i} \frac{\partial \Xi_i^i}{\partial X^I} \right) dX + \lambda \int_{\Omega} \Xi_i^i \delta^{ij} \delta_{IJ} \mathcal{U}_{F_j^j} dX \\ &= \int_{\Omega} \left[ \xi^i \left( \frac{dm_i}{dt} - \frac{\partial \mathcal{U}_{F_i^i}}{\partial X^I} \right) + \Xi_i^i \left( \frac{dF_i^i}{dt} - \frac{\partial \mathcal{U}_{m_i}}{\partial X^I} + \lambda \delta^{ij} \delta_{IJ} \mathcal{U}_{F_j^j} \right) \right] dX + \int_{\partial\Omega} \mathcal{U}_{m_i} \Xi_i^i N_i dA \end{aligned} \quad (3.49)$$

となる。これが任意の  $\xi$  及び  $\Xi$  に対して成り立つことから

$$\frac{dm_i}{dt} = \frac{\partial \mathcal{U}_{F_i^i}}{\partial X^I}, \quad \frac{dF_i^i}{dt} = \frac{\partial \mathcal{U}_{m_i}}{\partial X^I} - \lambda \delta^{ij} \delta_{IJ} \mathcal{U}_{F_j^j} \quad (3.50)$$

が得られる。

#### (2-4) 変分原理

変分原理を用いて定式化することにより、HMPS法と類似の数値解法を開発できる可能性が生じる。Lagrangian 密度  $L(v, F)$  ただし  $v = \partial\chi/\partial t, F = \nabla\chi$  に対して作用を

$$\mathcal{A}[\chi] = \int_{t_1}^{t_2} \int_{\Omega} L\left(\frac{\partial\chi}{\partial t}, \nabla\chi\right) dX dt \quad (3.51)$$

と定義する。そのとき

$$\begin{aligned} \delta\mathcal{A}[\chi; \delta\chi] &= \frac{d}{d\epsilon} \int_{t_1}^{t_2} \int_{\Omega} L\left(\frac{\partial}{\partial t}(\chi + \epsilon\delta\chi), \nabla(\chi + \epsilon\delta\chi)\right) dX dt \Big|_{\epsilon=0} \\ &= \int_{t_1}^{t_2} \int_{\Omega} \left( L_v \cdot \frac{\partial\delta\chi}{\partial t} + L_F \cdot \nabla\delta\chi \right) dX dt \\ &= - \int_{t_1}^{t_2} \int_{\Omega} \left( \frac{\partial L_v}{\partial t} + \nabla \cdot L_F \right) \cdot \delta\chi dX dt \\ &\quad + \int_{\Omega} [L_v \cdot \delta\chi]_{t=t_1}^{t=t_2} dX + \int_{t_1}^{t_2} \int_{\partial\Omega} (L_F \delta\chi) \cdot N dA \end{aligned} \quad (3.52)$$

であるから  $\delta\mathcal{A} = 0$  より

$$\frac{\partial L_v}{\partial t} + \nabla \cdot L_F = 0 \quad (3.53)$$

が得られる。ここで  $\mathcal{U}(m, F) = v \cdot m - L = v \cdot L_v - L$  ただし  $m = L_v$  とすると

$$d\mathcal{U} = m \cdot dv + v \cdot dm - L_v \cdot dv - L_F \cdot dF = v \cdot dm - L_F \cdot dF \quad (3.54)$$

であるから  $\mathcal{U}_m = v$  及び  $\mathcal{U}_F = -L_F$  となる。したがって (3.53) 式は

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \nabla \cdot \mathcal{U}_F \quad (3.55)$$

と表される。一方、 $v = \partial\chi/\partial t, F = \nabla\chi$  より

$$\nabla v = \nabla \frac{\partial\chi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \nabla\chi = \frac{\partial F}{\partial t} \quad (3.56)$$

すなわち

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \nabla v = \nabla \mathcal{U}_m \quad (3.57)$$

が成り立たなければならない。あるいは

$$\mathcal{A}[\chi, v, F, \Xi, H] = \int_{t_1}^{t_2} \int_{\Omega} \left\{ L(v, F) + \Xi \cdot \nabla \left( v - \frac{\partial\chi}{\partial t} \right) + H \cdot \frac{\partial}{\partial t} (F - \nabla\chi) \right\} dX dt \quad (3.58)$$

とすると

$$\delta\mathcal{A}[\chi, v, F, \Xi, H; \delta\chi, \delta v, \delta F, \delta\Xi, \delta H]$$

$$\begin{aligned} &= \frac{d}{d\epsilon} \int_{t_1}^{t_2} \int_{\Omega} \left\{ L(v + \epsilon\delta v, F + \epsilon\delta F) + (\Xi + \epsilon\delta\Xi) \cdot \nabla \left[ v + \epsilon\delta v - \frac{\partial}{\partial t} (\chi + \epsilon\delta\chi) \right] \right. \\ &\quad \left. + (H + \epsilon\delta H) \cdot \frac{\partial}{\partial t} [F + \epsilon\delta F - \nabla(\chi + \epsilon\delta\chi)] \right\} dX dt \Big|_{\epsilon=0} \\ &= \int_{t_1}^{t_2} \int_{\Omega} \left\{ L_v \cdot \delta v + L_F \cdot \delta F + \delta\Xi \cdot \nabla \left( v - \frac{\partial\chi}{\partial t} \right) + \Xi \cdot \left( \nabla\delta v - \nabla \frac{\partial\delta\chi}{\partial t} \right) \right. \\ &\quad \left. + \delta H \cdot \frac{\partial}{\partial t} (F - \nabla\chi) + H \cdot \left( \frac{\partial}{\partial t} \delta F - \frac{\partial}{\partial t} \nabla\delta\chi \right) \right\} dX dt \\ &= \int_{t_1}^{t_2} \int_{\Omega} \left\{ (L_v - \nabla \cdot \Xi) \cdot \delta v + \left( L_F - \frac{\partial H}{\partial t} \right) \cdot \delta F - \left( \frac{\partial}{\partial t} \nabla \cdot \Xi + \nabla \cdot \frac{\partial H}{\partial t} \right) \cdot \delta\chi \right. \\ &\quad \left. + \nabla \left( v - \frac{\partial\chi}{\partial t} \right) \cdot \delta\Xi + \frac{\partial}{\partial t} (F - \nabla\chi) \cdot \delta H \right\} dX dt \end{aligned} \quad (3.59)$$

であるから  $\delta\mathcal{A} = 0$  より

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \Xi &= L_v, & \frac{\partial H}{\partial t} &= L_F, \\ \frac{\partial}{\partial t} \nabla \cdot \Xi + \nabla \cdot \frac{\partial H}{\partial t} &= 0, \end{aligned} \quad (3.60)$$

$$\nabla v = \nabla \frac{\partial\chi}{\partial t}, \quad \frac{\partial F}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \nabla\chi$$

が得られる。ここで  $\mathcal{U}(m, F) = v \cdot m - L = v \cdot L_v - L$  ただし  $m = L_v$  とすると、(3.54)式より  $\mathcal{U}_m = v$  及び  $\mathcal{U}_F = -L_F$  であるから、そのとき(3.60)式は

$$\frac{\partial L_v}{\partial t} + \nabla \cdot L_F = \frac{\partial m}{\partial t} - \nabla \cdot \mathcal{U}_F = 0, \tag{3.61}$$
$$\frac{\partial F}{\partial t} = \nabla v = \nabla \mathcal{U}_m$$

となる。

以上に示した変分原理に対して HMPS 法と同様の離散化を行うことによって、速度勾配テンソルを未知関数とする構造保存型の粒子法を開発することができると考えられる。

### 3.1.4. MPS法によるデブリ流下・集中挙動の計算機実験

#### 3.1.4.1. 平成29年度の実施内容及び成果

##### (1) 等温解析条件及び実験条件の検討

一般に実機規模の大きなスケールの spreading は溶融物の慣性力、重力、粘性力に支配される（表面張力や接触角度の影響は無視できる）。これらは無次元数（ $Re$  数、 $Fr$  数、 $Ga$  数）により特徴付けられ、小規模実験にスケーリングする際には、これらの無次元数が保存するように、流量と粘性を低減する必要がある。一方、本研究では、利用可能な計算機資源の制約から、MPS法の解析に用いることができる粒子数は最大で約 300,000 である。平成28年度に作成した実機の 1/100 スケール体系（再委託先：電力中央研究所）を対象とする場合、解像可能なスケール（粒子径）は約 0.5 mm となる。従って、この解像度で適切に流動を離散化するには、溶融物の粘性と流量を十分に大きくして、spreading 先端部の溶融物の厚みを大きくしなくてはならない。又、空中を流下する溶融物が床面に接着するまでの間、解析の解像度が不十分の場合、数値的に流動が不連続になる問題がある。そこで、本研究では、MPS法による溶融物挙動解析の妥当性検証のために必要な解析条件と電力中央研究所で実施可能な模擬デブリ流下実験の条件を検討した。このとき、大阪大学で実施されている液滴衝突実験の結果も踏まえて、模擬溶融物には、想定される実験条件で粘性と表面張力の不確かさが小さく、広い範囲のパラメータ制御が可能なシリコン油を用いることとした。これらも踏まえて、MPS法の解析結果検証用の条件を含め、幅広い条件で模擬デブリ流下実験を行うことで、解析の妥当性の検証と実機事故条件と解析条件の間のスケール効果を検討することとした。

そこで先ず、**図 3.1-24(a)**に示すような平板 spreading 実験体系を考え、シリコン油の spreading 実験を電力中央研究所で実施し、spreading 時の液膜厚さを測定し、そのような spreading を MPS法により精度よく予測するために必要な粒子径を評価した。**図 3.1-24(b)**及び**(c)**に粒子径を 0.2 mm とした場合の解析結果例を示す。検討した条件を**表 3.1-8**にまとめる。

異なる粒子径の解析結果と実験結果から測定された spreading 高さとの比較をノズルの高さが 5 mm の場合について**図 3.1-25**に示す。粒子径が 0.2 mm のケースと 0.4 mm のケースは結果がほぼ完全に一致しており、粒子径に対して解析結果が収束していることが分かる。又、粒子径が 0.7 mm 以下であれば解析結果は実験による測定結果と良く一致していることが分かる。又、ノズル高さを 10 mm としたケースでも同様な結果が得られた。従って、同実験条件を考える場合、粒子径は概ね 0.7 mm 以下であれば妥当であると考えられる。本研究では、これらの結果も参考に、以降は粒子径を 0.5 mm とし解析結果と実験結果を比較することとした。

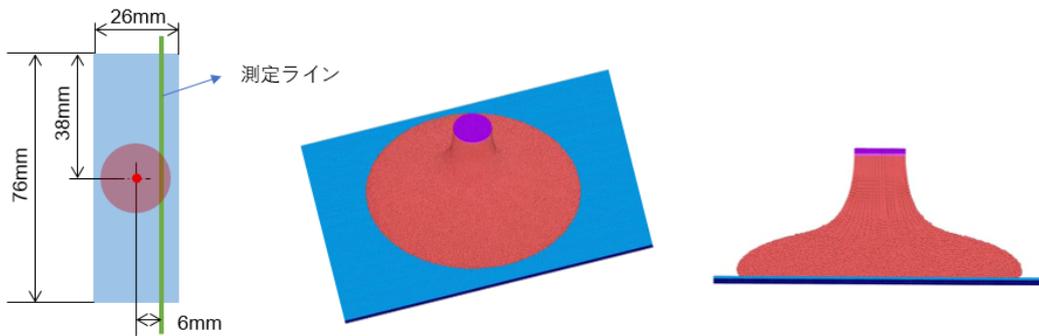
以上のように、**表 3.1-8**に示した平板 spreading 実験条件と解析結果と実験結果の比較結果を勘案し、MPS法によるデブリ流下・集中挙動の計算機実験の条件を、本研究で利用可能な計算機資源による制約も踏まえて定めた。定めた条件を**表 3.1-9**にまとめる。

表 3.1-8 : 平板 spreading 実験及び解析条件

パラメータ	値
動粘度 ( $\text{mm}^2/\text{s}$ )	5000
密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	975
流下流量 ( $\text{ml}/\text{min}$ )	25
ノズル内径/高さ (mm)	4/5, 10
粒子径 (mm)	0.2, 0.4, 0.7, 1.0

表 3.1-9 : MPS 法によるデブリ流下・集中挙動の計算機実験の条件

パラメータ	計算機資源による制約
熔融物の粘性 ( $\text{mm}^2/\text{s}$ )	> 5000
熔融物の流量 ( $\text{ml}/\text{min}$ )	> 30
ノズル内径 (mm)	> 6.0
ノズル流下高さ (mm)	< 10



(a) 体系と液膜測定位置 (b) 解析結果例 (鳥観図) (c) 解析結果例 (垂直断面)

図 3.1-24 : 平板 spreading 実験及び解析の体系と解析結果例 (粒子径 : 0.2 mm)

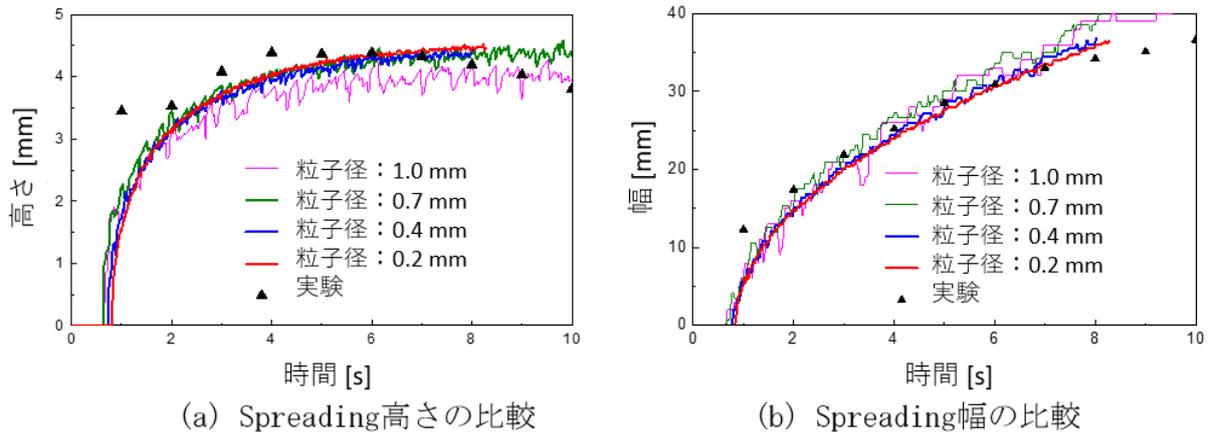


図 3.1-25：平板 spreading 実験と異なる粒子径の解析結果の比較（ノズル高さ：5 mm）

## (2) 等温解析及び実験の結果

MPS 法による解析の妥当性の検証と実機事故条件へのスケーリング効果を検討するため、電力中央研究所で合計 9 ケースの模擬デブリ流下実験が実施された。これらの 9 ケースの実験条件を表 3.1-10 にまとめる。これらの 9 ケースのうち、4 ケースは上述の利用可能な計算機資源の制約等も考慮し、MPS 法の妥当性検証のために、模擬デブリとして高粘性のシリコーン油 ( $5000.0 \text{ mm}^2/\text{s}$ ) を用いて実施された。spreading の対称性と計測線の位置関係等も考慮して実施された 4 ケースの溶融物流下位置 (C0, W1, S1, S2) 及び計測線を図 3.1-26 に示す。

サンプルピット A 及び B の中間地点で、計測線の反対側に位置する S1 に流下した場合を例に、解析した結果を示す。まず、実験体系のスケール（実機の 1/100 スケール）が溶融物の流動に及ぼす影響を評価するため、表面張力が spreading に及ぼす影響を検討した。実験に用いられたシリコーン油の表面張力は  $0.0213 \text{ N/m}$  であった。接触角は  $90^\circ$  を仮定した。MPS 法の表面張力モデルには近藤らによるポテンシャルモデルに基づくモデル [47] を用いた。これらの条件とモデルを用いて、以下の異なる 3 ケースを解析した：(i) 表面張力を考慮しなかった場合、(ii) 表面張力のみ考慮した場合、(iii) 表面張力と接触角 ( $90^\circ$ ) を考慮した場合。

上記の 3 ケースの解析結果の様子を図 3.1-27 にまとめる。これらの結果より、表面張力を考慮しないケースでは、実験で観察されたよりも早期に溶融物がペDESTAL 開口部に侵入し、ペDESTAL 外に流出している様子が分かる。又、これらのケースで測定された spreading 幅とサンプルピットへの流入質量の比較を図 3.1-28 に示す。このような定量的な比較からも、表面張力を考慮しないと spreading 幅を過大評価していることが分かる。表面張力を考慮した場合、解析結果は測定結果に近づき、更に接触角を考慮することで、良く一致することが分かる。これらの比較より、1/100 スケールで表 3.1-9 に定めた条件では、表面張力及び接触角の考慮が必要であることが明らかになった。一方、2 つのサンプルピットへの溶融物の流入量は解析ではほぼ等しいのに対し、実験ではサンプルピット B への流入量がサンプルピット A への流入量を上回った。溶融物の流下位置は両サンプルピットの中間点であるため、両サンプルピットへの流入量の差はランダム要素を含む実験誤差に起因していると考えられる。

模擬デブリ流下実験と MPS 解析結果の比較(1/100 スケール, 流下位置 S1, 粘性係数  $5000\text{mm}^2/\text{s}$ ) を図 3.1-29 に示す。表面張力と接触角を考慮したことで解析結果は実験結果と良く一致した。又、代表的な時刻 ( $t=15$  秒,  $t=25$  秒) における図 3.1-26 に示した計測線上の溶融物の分布も図 3.1-30 に示すように良く一致した。

表 3.1-10 : 模擬デブリ流下実験の実験条件表

No	模型縮尺	粘性係数	流下位置	流量	濡れ性	ケース名
1	01:1/100	$5000\text{mm}^2/\text{s}$	C0:中心	40ml/min	N:調整無し	015000C0N180228
2	01:1/100	$5000\text{mm}^2/\text{s}$	S2:南側 2 (遠い側)	40ml/min	N:調整無し	015000S2N171220
3	01:1/100	$5000\text{mm}^2/\text{s}$	W1:西側 1	40ml/min	N:調整無し	015000W1N171221
4	01:1/100	$5000\text{mm}^2/\text{s}$	S1:南側 1 (中央寄り)	40ml/min	N:調整無し	015000S1N171222
5	01:1/100	$1000\text{mm}^2/\text{s}$	S2:南側 2 (遠い側)	40ml/min	N:調整無し	011000S2N180220
6	01:1/100	$200\text{mm}^2/\text{s}$	S2:南側 2 (遠い側)	40ml/min	N:調整無し	010200S2N180117
7	01:1/100	$50\text{mm}^2/\text{s}$	S2:南側 2 (遠い側)	40ml/min	N:調整無し	010050S2N180118
8	01:1/100	$5000\text{mm}^2/\text{s}$	S2:南側 2 (遠い側)	20ml/min	N:調整無し	015000S2N180215
9	02:1/50	$5000\text{mm}^2/\text{s}$	S2:南側 2 (遠い側)	160ml/min.	N:調整無し	025000S2N180302

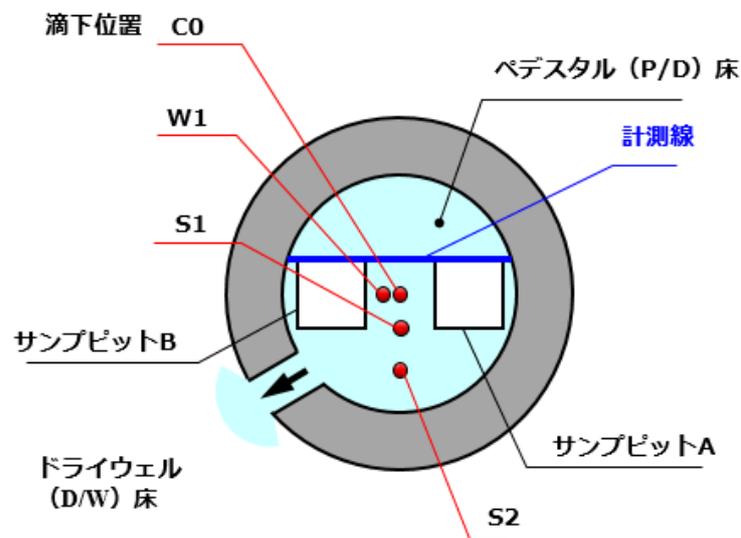
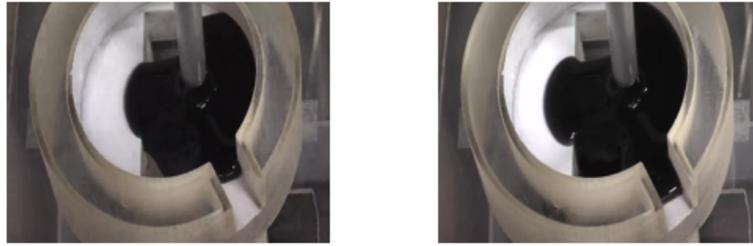


図 3.1-26 : 模擬デブリ流下実験の溶融物流下位置及び計測線 (1/100 スケール)

実験の様子



(i) 表面張力を考慮しなかった場合



(ii) 表面張力のみ考慮した場合



(iii) 表面張力と接触角 (90°) を考慮した場合



(a) 時刻：15.0秒

(b) 時刻：25.0秒

図 3.1-27：表面張力モデルが spreading に及ぼす影響の様子 (1/100 スケール体系、流下位置 S1、動粘度  $5000\text{mm}^2/\text{s}$ )

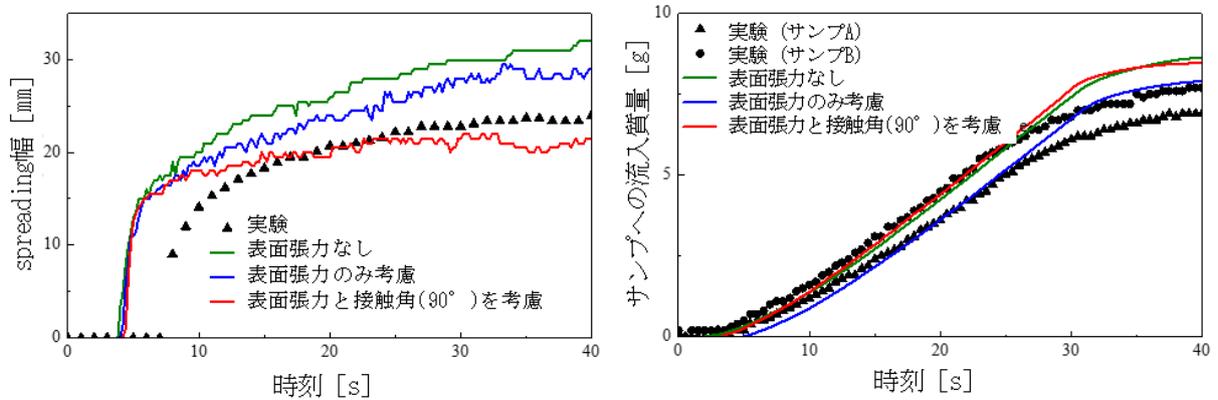


図 3.1-28：表面張力モデルが spreading に及ぼす定量的な影響 (1/100 スケール体系、流下位置 S1、動粘度  $5000\text{mm}^2/\text{s}$ )

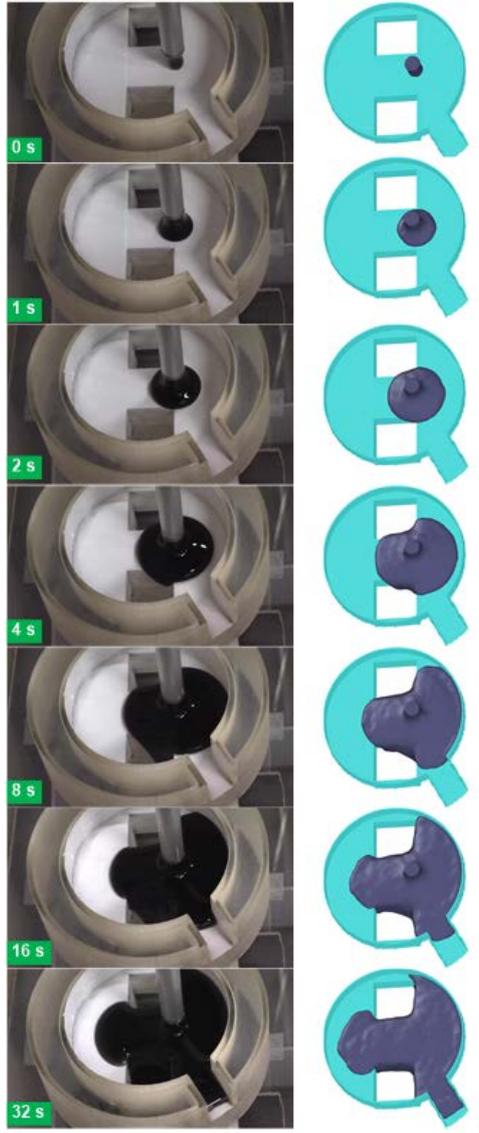


図 3.1-29 : デブリ流下実験と MPS 解析結果の比較 (1/100 スケール、 流下位置 S1、粘性係数  $5000\text{mm}^2/\text{s}$ )

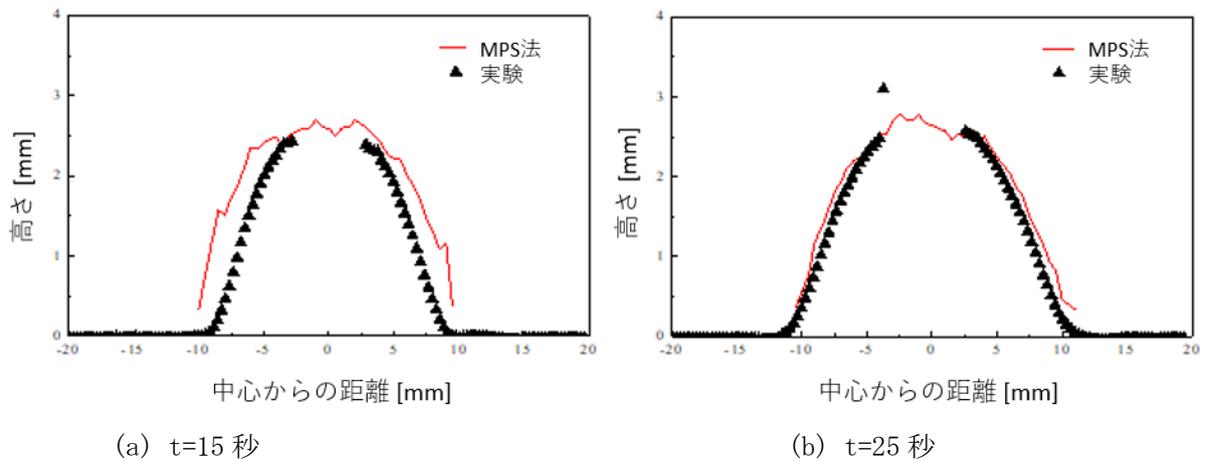


図 3.1-30 : 溶融物高さ分布の比較 (1/100 スケール、 流下位置 S1、粘性係数  $5000\text{mm}^2/\text{s}$ )

### 3.1.4.2. 平成30年度の実施内容及び成果

#### (1) 伝熱・アブレーションを伴う解析条件及び実験条件の検討

平成29年度までに整備したMPS法の解析コードを用い、電力中央研究所で実施された伝熱・アブレーションを伴う模擬デブリ流下実験に対応するMPS法の解析を実施した。模擬デブリの流下位置と量は平成29年度に実施した条件と同じ条件を基準に、流下流量を変更したケースも実験及び解析の対象とした。模擬デブリ流下地点と模擬ペDESTALのアブレーション測定位置を図3.1-31に示す。

電力中央研究所で実施された実験において、模擬デブリとして用いられたシリコーン油の物性は製造者により提供されており、解析には製造者提供情報を用いた。解析に用いたシリコーン油の物性値を表3.1-11にまとめる。一方、実験において模擬ペDESTAL床として用いられたパラフィンの正確な物性値は入手できなかったため、主な製造者により公開されている物性値を調べた。その上で、解析結果に対する感度が低いと考えられる物性値については平均値を用い、感度が高いと考えられる物性値については異なる値を用いた感度解析を実施した。これらの解析に用いたパラフィンの物性値を表3.1-12にまとめる。

表 3.1-11：解析に用いたシリコーン油の物性値

物性	値
動粘度 (mm <sup>2</sup> /s)	$5000 \times 10^{0.162823-0.00651293 \cdot T}$ (20°C < T < 150°C)
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	1000.0
熱伝導率 (W/m/K)	0.16
比熱 (kJ/kg/K)	1.51

表 3.1-12：解析に用いたパラフィンの物性値

物性	代表値	感度解析値
固体密度 (kg/m <sup>3</sup> )	937	
液体密度 (kg/m <sup>3</sup> )	783	
液体動粘度 (mm <sup>2</sup> /s)	6.4	
融点 (°C)	69*	
熱伝導率 (W/m/K)		0.14, <u>0.2</u> , 0.26
比熱 (kJ/kg/K)		1.5, <u>2.0</u> , 2.5
潜熱 (kJ/kg)		140, <u>180</u> , 220

下線の値を標準解析ケースに用いた

\*解析に液相線温度と固相線温度をそれぞれ69.5°C、68.5°Cと仮定して用いた。

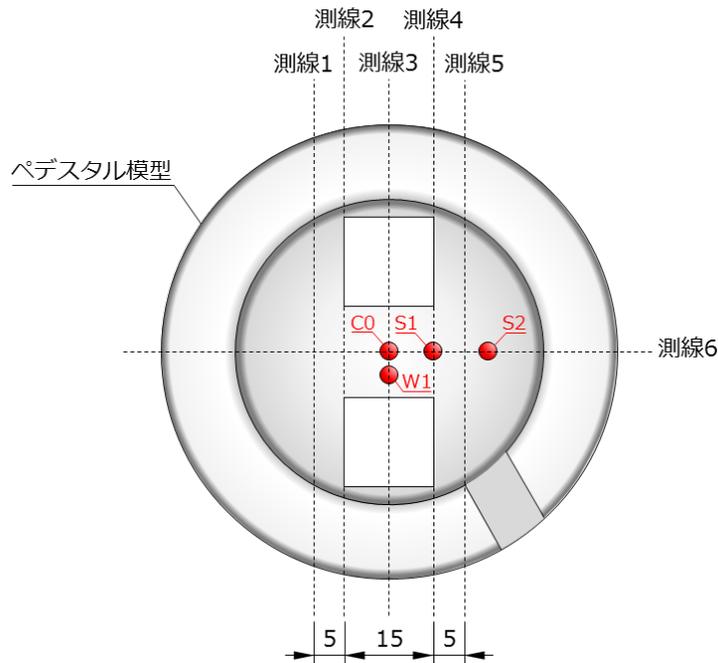


図 3.1-31：模擬デブリ流下地点と模擬ペダスタルのアブレーション測定位置

## (2) 物性値の不確かさが解析結果に及ぼす影響の検討

実験ケース名：M5000V40T110S1（熔融物初期温度：110℃、流量：40g/min、流下点：S1）のケースを例に、表 3.1-12 にまとめた物性値の不確かさが解析結果に及ぼす影響を検討した。実験結果と解析結果の様子の比較を図 3.1-32 に示す。解析は床材のアブレーション量を過小評価している様子が分かる。

そこで定量的に検討するため、図 3.1-31 に示した測線 6 上のアブレーション分布を比較した。その結果を図 3.1-33 に示す。パラフィンの比熱を変化させても解析はアブレーションを過小評価していることが分かる。実験後の測定結果によれば、アブレーションされた床の質量は約 0.43g であったが、解析結果は約 0.12g であった。このとき、パラフィンの熱伝導率、比熱、潜熱の不確かさがアブレーション質量の解析結果に及ぼす影響はそれぞれ約 0.02g、0.08g、0.04g と小さく、これらの物性値の不確かさは過小評価の主因ではないと考えられる。

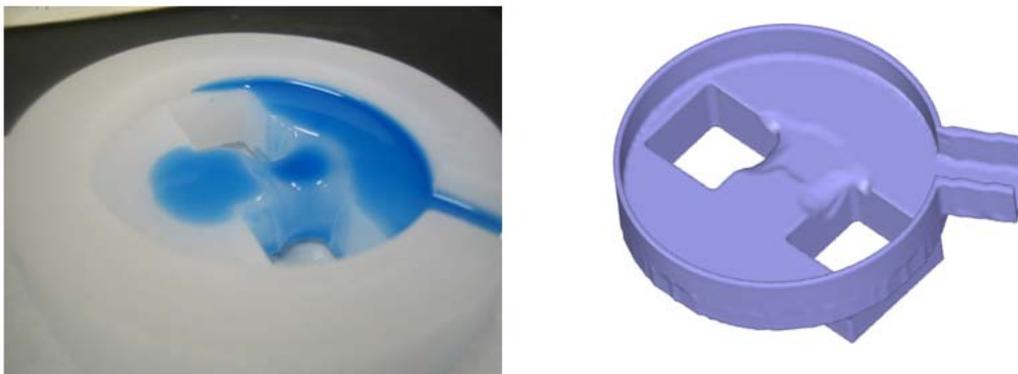


図 3.1-32：実験結果と解析結果の様子の比較（ケース名：ケース名：M5000V40T110S1）

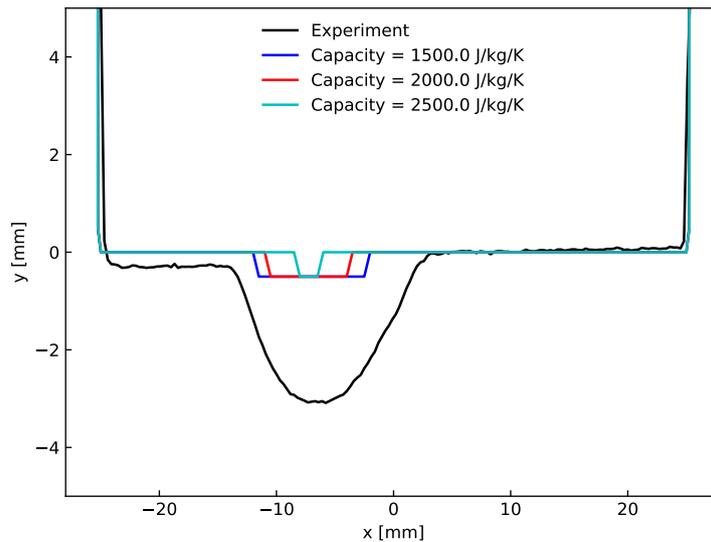


図 3.1-33：実験と解析のアブレーション比較（ケース名：M5000V40T110S1／測線 6）

### (3) 境界条件と解析の解像度が解析結果に及ぼす影響の検討

表 3.1-12 に示されているように、液体パラフィンの動粘度は水のように小さい。この場合、パラフィン製の床に高温のシリコン油が接触すると、図 3.1-34 に示すような動粘度の低い液体の境界層が形成されることが考えられる。シリコン油の動粘度は高いため、シリコン油の流れは層流と考えられるが、このような液体パラフィンの境界層は動粘度が小さく、薄い境界層内に大きな速度勾配が生じ、大きな対流伝熱が生じることが考えられる。このような薄い境界層を数値解析で直接解くには境界層を十分に解像する必要があり、本研究で利用可能な計算機資源の制約から現実的ではない。

そこで本研究では、通常 MPS 法の解析に用いられる nonslip 境界に代えて slip 境界を用いることを検討した。MPS 法で nonslip 境界を用いる場合、図 3.1-35(a) に示すように壁粒子  $j$  は近傍の流体粒子  $i$  と反対の仮想的な速度が与えられる。一方、slip 境界を用いる場合は、図 3.1-35(b) に示すように壁粒子  $j$  は近傍の流体粒子  $i$  と同じ速度が仮想的に与えられる。それぞれの境界モデルを用いて行った二次元解析のアブレーションと速度分布の比較を図 3.1-36 に示す。シリコン油の動粘度が大きいため、nonslip 境界を用いると、シリコン油中の液体粒子の速度分布は緩やかに変化する。そのため、パラフィンとの界面近傍の伝熱は接触熱伝導のようになる。一方、slip 境界を用いると、界面近傍で液体粒子の速度分布が急激に変化するため、界面伝熱は対流伝熱のようになり、界面の実効的な熱伝達率が大きくなる。このときの伝熱量は解析の解像度（粒子径）に依存すると考えられる。そこで、二次元体系で異なる粒子径を用いて粒子径に対する解析結果の収束性を調べたところ、粒子径 0.25mm 以下でアブレーション量が収束することが分かった。

以上から、シリコン油とパラフィンの界面に生じる薄い境界層を考慮すると、境界部を直接解くことは現実的ではないため、壁境界に slip 境界を用いることが適切と考えられる。このときに計算される対流伝熱は粒子径に依存するが、二次元解析では粒子径 0.25mm 程度以下であ

れば解析結果が収束することが確かめられた。しかし、三次元解析では計算コストが増大するため、 $0.25\text{mm}$ の小さな粒子径を用いることは、本研究で利用可能な計算機資源の制約下では困難である。また、三次元解析でスリップ境界を用いると、数値的な不安定性を招くことが予想され、計算のタイムステップを小さくする必要がある。従って、三次元解析にスリップ境界を用いることは困難と考えられる。

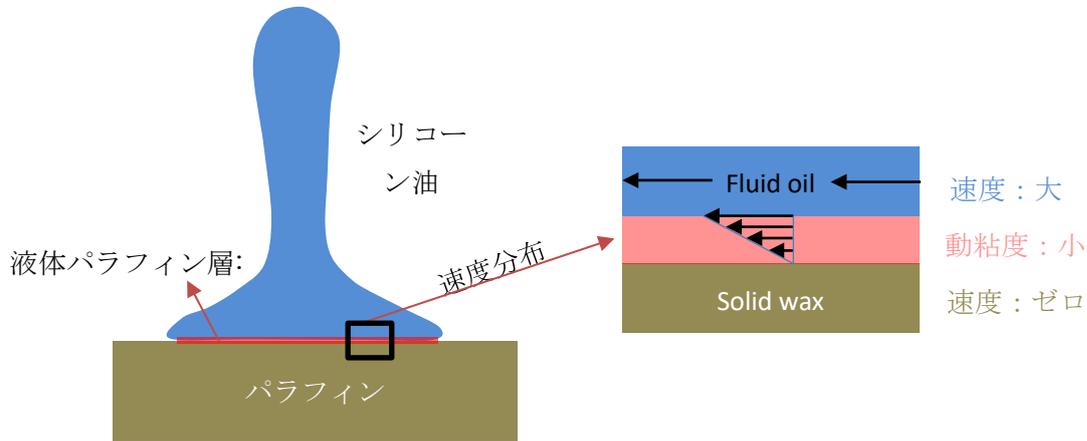


図 3.1-34 : スリップ境界層の概念図

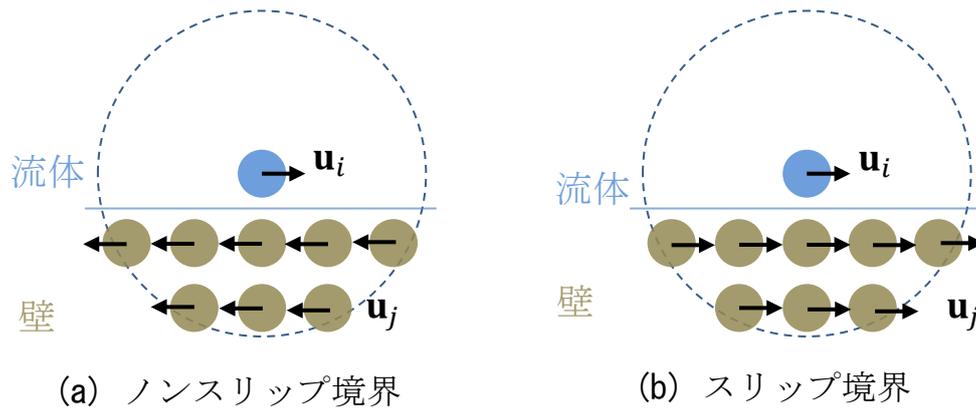


図 3.1-35 : ノンスリップ境界とスリップ境界のモデルの比較

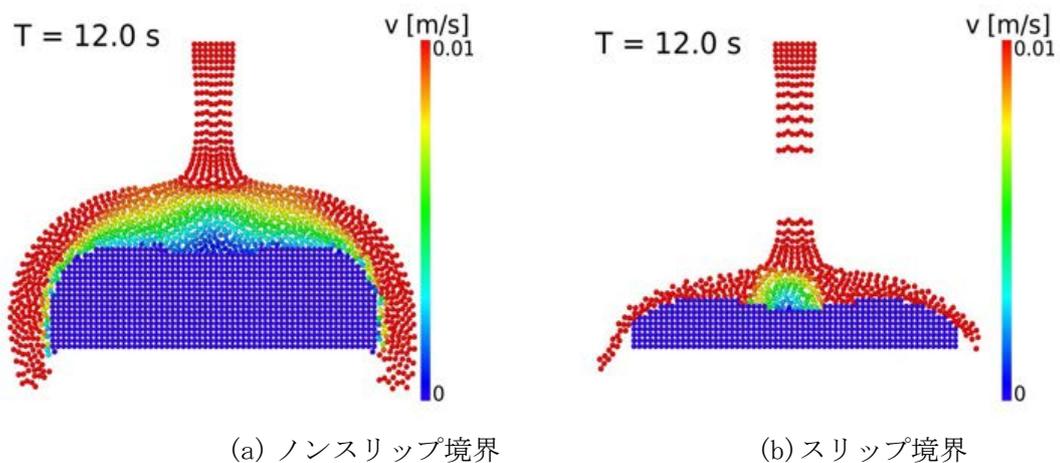


図 3.1-36 : 異なる境界モデルを用いたときのアブレーションと速度分布の比較

#### (4) 境界層の伝熱促進モデル

本研究では計算機資源の制約等からシリコン油とパラフィンの境界層のスリップ現象を直接解くことやスリップ境界モデルを用いることの代替として、境界層の伝熱促進効果をモデル化することを検討した。MPS法では対流伝熱は、粒子間の熱伝導と、粒子の運動により表される。そこで、粒子間の実効熱伝導率をMPS法の乱流モデル [48]を参考に次式のように促進することを検討した。

$$k_t = k_m + k_c \quad (3.62)$$

ここで、 $k_t$ は補正後の実効熱伝導率、 $k_m$ は補正前の熱伝導率、 $k_c$ は境界層の対流に伴う熱伝導率の向上を表す。MPS法の乱流モデルと同様に、 $k_c$ は次式のように速度の勾配に依存する次式で与えた。

$$k_c = \rho C_p \frac{v_t}{Pr} \quad (3.63)$$

ここで、 $Pr$ はPrandtl数 ( $Pr = 1.0$ ) であり、 $v_t$ は次式で与えられる渦粘性 [48]である。

$$v_t = (Cs \cdot r_e)^2 \sqrt{2S_{\alpha\beta}S_{\alpha\beta}} \quad (3.64)$$

ここで、 $Cs$ は対流係数、 $r_e$ は粒子の影響半径、 $S_{\alpha\beta}$ は次式で与えられる歪テンソルである。

$$S_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_\alpha}{\partial x_\beta} + \frac{\partial u_\beta}{\partial x_\alpha} \right) \quad (3.65)$$

このようにして、境界層の対流伝熱促進効果をモデル化した。

前述のようにMPS法の三次元解析でスリップ境界を用いると数値不安定性を回避するために計算タイムステップを極めて小さくする必要が生じるため、本研究の以降の解析ではスリップ境界に一定の壁抵抗係数 (0.15) を付与した擬スリップ境界を用いた。そして、上述の境界層の対流伝熱促進モデルを用いることで、境界部の対流伝熱を考慮した。このとき、(3.53) 式中の対流係数 $Cs$ は実質的には調整係数とみなされる。

そこで対流係数 $Cs$ をパラメータに感度解析を実施した。前述と同じ実験ケース (ケース名: M5000V40T110S1) の測線6におけるアブレーションの実験と解析の比較を図 3.1-37 に示す。 $Cs$ の値が約0.09のときに解析結果は実験結果をよく再現していることが分かる。一方、アブレーション分布の積分に相当するペダスタル領域全域のアブレーション質量は $Cs$ の値が約0.06のときに実験結果に最も近い値となった (実験: 0.434g、解析: 0.489g)。これらの総合的な分析結果から、以降の解析ではこれらのパラメータの最適値として壁抵抗係数を0.15、 $Cs$ を0.06とした。実験結果、従来の解析結果と合わせて図 3.1-38 に示す。

最適化したパラメータを用いて、電力中央研究所で実施された実験の全12ケースを解析した。これらの12ケースの実験条件を表 3.1-13 にまとめる。解析の結果、ケース1、2、3、4、5、8、10、11、12では概ね実験結果を良く再現できた。例として、ケース1 (ケース名: M5000V40T110C0) のアブレーション分布を図 3.1-39 に示す。ここで、図中のLine 1~6は、図 3.1-31 に示した測線1~6に対応している。ケース5、7、11、12の解析はアブレーションを過小評価する傾向が見られた。例としてケース7 (ケース名: M5000V40T140S2) のアブレーション分布を図 3.1-40 に示す。これらのケースはシリコン油の初期温度が他のケースに比べて高い

(140℃)。境界層の対流伝熱促進パラメータの最適値は溶融物の初期温度に依存する（例えば境界層の厚さが溶融物の初期温度に依存する）ことが考えられる。

一方、ケース 6、9 ではアブレーションが過大評価される傾向が見られた。特に、ケース 6 は、ケース 1 から溶融物の初期温度を向上したケース（110℃→140℃）であるにも関わらず、実験結果によればケース 6 のアブレーション体積はケースのアブレーション体積よりも小さい（ケース 1 : 1,254mm<sup>3</sup>、ケース 6 : 645mm<sup>3</sup>）。このような複雑な現象を MPS 法で予測するにはさらなる解析精度の検証が今後必要と考えられる。

表 3.1-13：アブレーションを伴う模擬デブリ流下実験の条件表

No.	模型縮尺	粘性係数 (mm <sup>2</sup> /s)	初期温度 (℃)	流下位置	流下流量 (g/min)	ケース名	実施日
1	1/100	5000	110	C0：中心	40	M5000V40T110C0	181024_1
2	1/100	5000	110	S1	40	M5000V40T110S1	181028_2
3	1/100	5000	110	S2	40	M5000V40T110S2	181024_2
4	1/100	5000	110	W1	40	M5000V40T110W1	181025_3
5	1/100	5000	125	S2	40	M5000V40T125S2	181102_1
6	1/100	5000	140	C0	40	M5000V40T140C0	181030_1
7	1/100	5000	140	S2	40	M5000V40T140S2	181101_1
8	1/100	5000	110	S2	20	M5000V20T110S2	181112_1
9	1/100	5000	140	S2	20	M5000V20T140S2	181112_2
10	1/100	5000	110	S2	80	M5000V80T110S2	181115_1
11	1/100	5000	125	S2	80	M5000V80T125S2	181116_3
12	1/100	5000	140	S2	80	M5000V80T140S2	181116_1

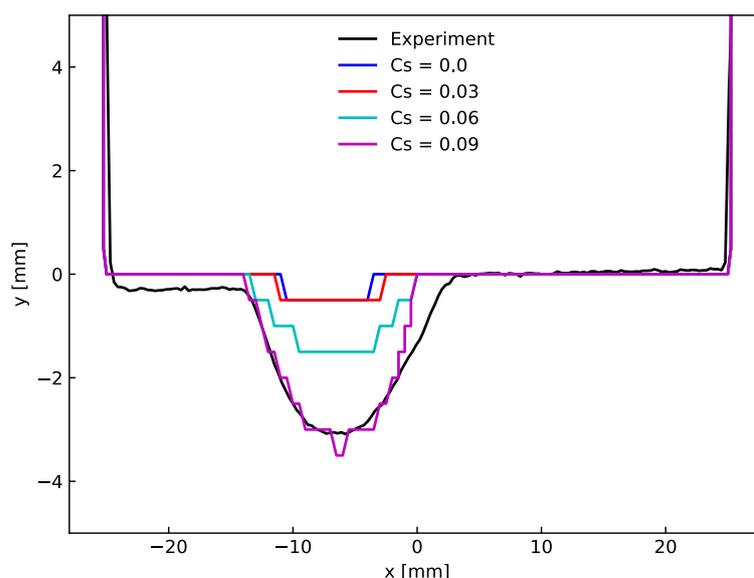
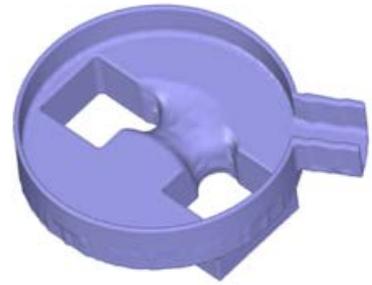
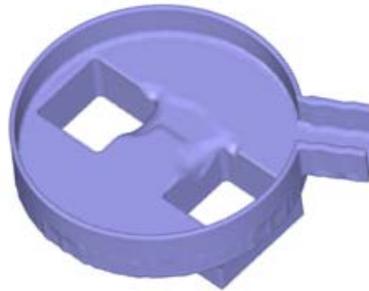


図 3.1-37：実験と解析（対流促進モデル利用）のアブレーション比較（ケース名：M5000V40T110S1／測線 6）



(a) 実験

(b) 解析 (従来)

(c) 解析 (境界層伝熱促進)

図 3.1-38 : 実験結果と解析結果の比較 (ケース名 : M5000V40T110S1)

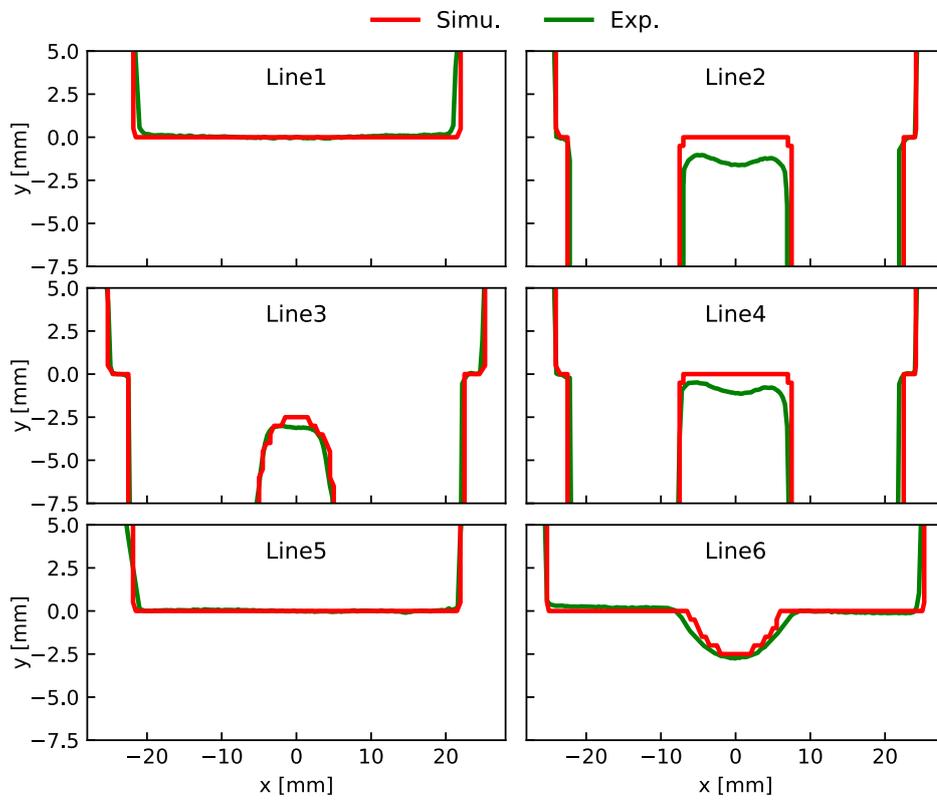


図 3.1-39 : 実験結果と解析結果のアブレーション分布の比較 (ケース名 : M5000V40T110C0)

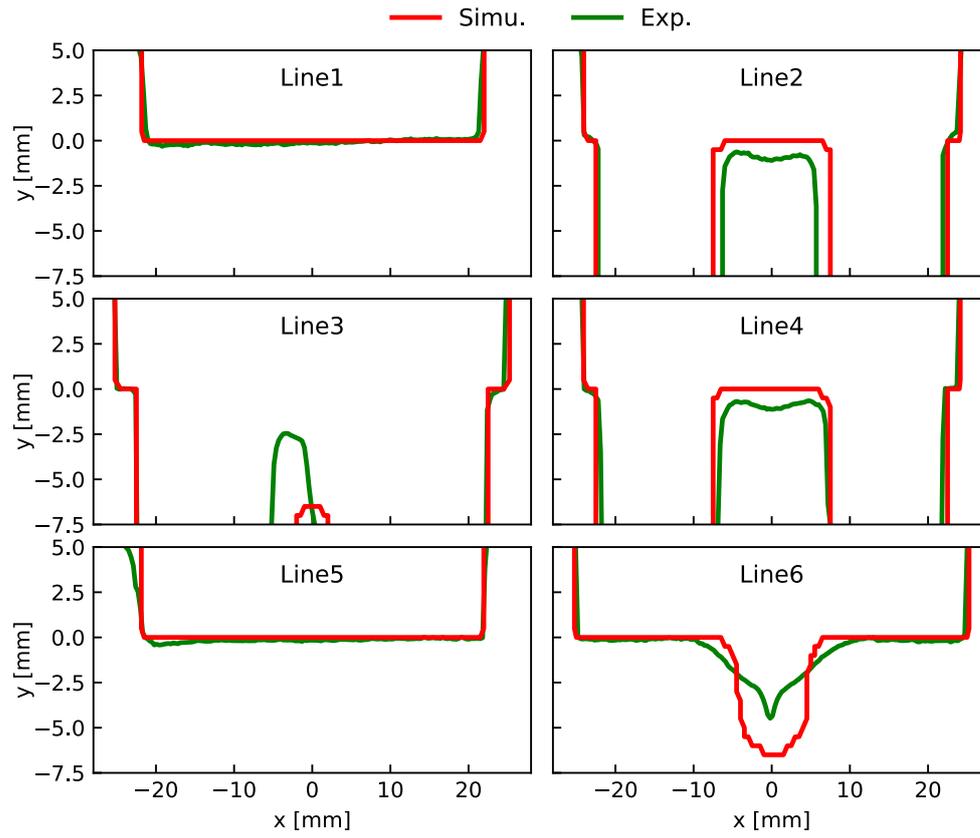


図 3.1-40：実験結果と解析結果のアブレーション分布の比較（ケース名：M5000V40T140C0）

### 3.1.5. 新しい高温融体粘性評価手法検討のための解析

本事業では、UO<sub>2</sub> 流下実験（再委託先：大阪大学）で得られた成果を反映し、模擬デブリ流下実験（再委託先：電力中央研究所）と、それに対応する MPS 法による計算機実験には、溶融物に表面張力と粘性を幅広く正確に制御できるシリコーン油を選定した。さらに、当初は計画していなかったが、大阪大学の液滴衝突法と早稲田大学が連携して、平成 30 年度には以下のように新しい融体の粘性評価手法（第 3.3.3.6 も参照）を検討した。

浮遊中の液滴が振動し、その振幅が小さい場合、その振動の周期 $\tau$ と液滴の表面張力 $\sigma$ の間には、次式の関係が成り立つことが知られている [49]。

$$\tau = 2\pi \sqrt{\frac{\rho R^3}{6\sigma}} \quad (3.66)$$

ここで $R$ は液滴の半径、 $\rho$ は液滴の密度である。さらに、粘性 $\eta$ は振動が減衰する際の減衰係数 $\Gamma$ を用いて以下のように評価することができる。

$$\eta = \frac{1}{5} \rho R^2 \Gamma \quad (3.67)$$

しかし、第 3.3.3.3 で説明されているように、UO<sub>2</sub> は蒸気圧が高く、長時間浮遊させていると、その間に蒸発してしまい、振幅の周期や減衰からこれらの物性を推定することが困難になると考えられる。そこで、再委託先の大阪大学で開発した衝突実験法を応用し、基板に落下衝突・反跳した液滴の振幅の減衰から試料の粘性を推定することを検討した。このとき、反跳後の液滴の振幅に、上記の浮遊中の液滴の振幅と同様な関係が成り立つのかを検討する必要がある。

そこで、液滴の振動の解析のように、高い精度で界面張力を計算できる Front Tracking 法を用いて空気雰囲気中に浮遊する液滴の振動と衝突・反跳後の液滴の振動の様子を比較した。解析に用いた（解析の入力で指定した）空気と液滴の物性を表 3.1-14 にまとめる。

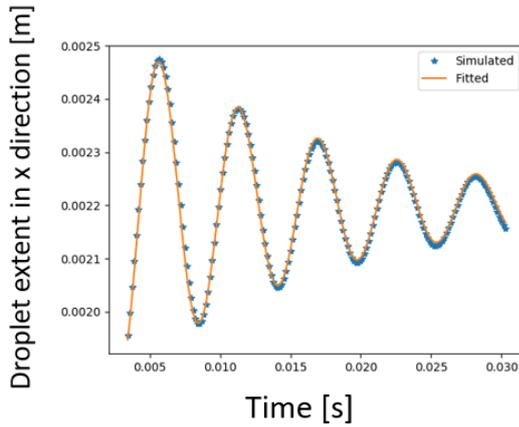
解析の結果、得られた液滴の $x$ 方向の振幅を図 3.1-41 に示す。また、 $x, y, z$ 方向の振幅の解析結果と (3.66) 式及び (3.67) 式を用いて算出した粘性率及び表面張力を表 3.1-15 にまとめる。入力指定値とえられた計算値を比較すると、両者は概ね良く一致しており、液滴衝突法で粘性率や表面張力を評価できる見込みが得られた。但し、表面張力を求めるために用いた (3.66) 式は振幅が小さい場合に成り立つ式であるため、表面張力はやや過大評価している。

表 3.1-14：液滴振動計算に用いた物性

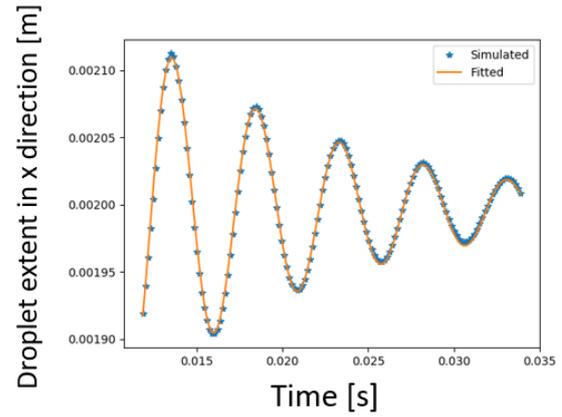
物性	空気	液滴
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	1.2	2,800
粘性率 (Pa·s)	1.8×10 <sup>-5</sup>	0.05
表面張力 (N/m)	-	0.6

表 3.1-15 : 液滴振動解析の物性入力値と結果から算出した物性値の比較

物性	解析の入力値	解析結果と (3.66) 式及び (3.67) 式を用いて算出した値					
		浮遊する液滴			衝突・反跳後の液滴		
		x方向	y方向	z方向	x方向	y方向	z方向
粘性率 (Pa·s)	0.050	0.046	0.046	0.045	0.046	0.048	0.046
表面張力 (N/m)	0.60	0.77	0.77	0.76	0.76	0.80	0.76



(a) 浮遊中の液滴



(b) 衝突・反跳後の液滴

図 3.1-41 : 液滴振幅の解析結果

### 3.1.6. まとめ

過去の Ex-Vessel 溶融物 spreading 挙動解析の検証に用いられた実験マトリックスを精査し、VULCANO VE-U7 実験を MPS 法による spreading 解析の検証対象に選定し、MPS 法の三次元 spreading 解析を実施した。クラストモデルを導入した新たな MPS 法による VULCANO VE-U7 実験の解析結果と実験データを分析し、同実験の spreading は、流動初期には重力/粘性支配の流動であるが、流動先端に形成されるクラストと流動の固液相互作用の結果、クラストが次第に発達し、やがてバルク流動をせき止めて最終的にバルク流動が停止に至る機構が考えられることが示された。解析結果は実験データや過去の研究と良く整合しており、新たな MPS 法の spreading 解析手法の妥当性が示された。更に、当初は想定していなかった新たな MPS 法のアルゴリズムを考案し、クラストの再溶融だけでなく、実機事故条件で想定されるクラストの機械的な破断のモデル化に成功した。この新モデルを MPS 法に組み込み、FARO L-26S 実験で観測された、クラスト形成による流動の一時停止と、クラスト破断による再流動を機構論的に示すことに世界で初めて成功し、当初の想定を超える成果が得られた。

過去の MCCI 解析の検証に用いられた実験マトリックスを精査し、VULCANO VB-U7 実験を MPS 法による MCCI 解析の検証対象に選定し、MPS 法の三次元 MCCI 解析を実施した。クラストモデルを導入した新たな MPS 法による VULCANO VB-U7 実験の解析結果と実験データを分析し、溶融物・クラスト相互作用の違いが MCCI におけるコンクリートの等方浸食/非等方浸食の違いをもたらす可能性を示した。特に、珪質岩系コンクリートでは粗骨材が側壁クラスト形成を阻害する一方で、底部ではヒートシンクの役割を果たし、クラストを安定化させ、非等方浸食がもたらされる機構

が考えられることが示された。解析結果は実験データや過去の研究と良く整合しており、新たな MPS 法の MCCI 解析手法の妥当性が示された。

将来の MPS 法の抜本的な改良（離散化後の運動エネルギーの厳密な保存などによる計算精度の向上）に向けた数学による精緻な離散化手法を検討し、非圧縮単相流れに対して解析力学と非平衡熱力学に基づいた定式化を検討した。また、その定式化によって表されるメカニズム（作用素の歪対称性と正定値対称性）を離散化後も正確に保存するような数値解法（構造保存型数値解法）を離散変分導関数法の手法に基づいて提案することに成功した。提案した数値解法に基づくメッシュ法及び HMPs 法の解析コードを開発し、非粘性の周期渦列のベンチマーク解析を実施し、いずれもエネルギー保存性を示すことに成功した。このとき、メッシュ法とは異なり、HMPs 法では速度勾配に依存する量（例：ヘリシティ）の保存性がないため、渦列が早期に崩壊することが明らかになった。このことに起因する MPS 法の解析精度の悪化を改善するために、速度勾配テンソルを未知関数とする定式化を検討した。

電力中央研究所で実施された伝熱及びアブレーションを伴わない模擬デブリ流下実験（等温実験）に対応する MPS 法の等温解析の結果、界面の正確な捕捉に十分な解像度が得られていることと、模擬デブリの流下時に数値的な不連続性が生じないことを確認し、適切な実験条件と解析条件を定めた。これらの条件では、模擬デブリ流下・集中挙動の解析結果は測定データと良く一致し、MPS 法の解析の妥当性を確認した。さらに、同様な条件で実施された伝熱・アブレーションを伴う模擬デブリ流下実験に対応する MPS 法の解析を実施した。従来のノンスリップ境界を用いる MPS 法の解析では計算コストや安定性の観点から溶融物の接触境界層を十分に考慮することが困難であるため、擬スリップ境界モデルと MPS 法の乱流モデルを応用した伝熱促進モデルを活用した解析を実施した。その結果、適切な伝熱促進パラメータを用いることで、実験で観測された溶融物の spreading や溶融物による床材のアブレーションを概ね再現できることを示した。

更に、当初は計画していなかったが、大阪大学で実施された液滴衝突実験に対応する解析 (Front Tracking 法) を早稲田大学で実施し、蒸気圧の高い試料（例： $\text{UO}_2$ ）にも適用可能であると考えられる新しい方法で粘性の評価ができる可能性を見出し、当初の想定を超える成果が得られた。

### 3.2. 模擬デブリ流下実験による MPS 解析結果の妥当性の検証（再委託先：電力中央研究所）

#### 3.2.1. 平成 28 年度の実施内容及び成果

##### 3.2.1.1. 模擬デブリの三次元流動可視化・定量化手法の検討

可視化手法を検討するために、シリコーン油（模擬デブリ）を床面（ペDESTAL模型）中心に落とし、油が床面上を流れる様子を撮影、計測できるような実験装置の構成を考えた（図 3.2-1）。床面構造には、ドレンサンプとスリットがあり（図 3.2-2）、BWR Mark-I 型格容器ペDESTALの図面をもとに 100 分の 1 及び 50 分の 1 に縮小したモデルを設計した。設計寸法をもとに三次元 CAD 図を作成し（図 3.2-3）、3D プリンタで三次元造形した（図 3.2-4）。床材の材質はアクリル系モノマー約 75%、ウレタンアクリレートオリゴマー約 20%、光重合開始剤約 5%である。

実験装置の構成をもとに表 3.2-1 に示すように、早稲田大学と連携して実験パラメータを定めた。模擬熔融炉心には黒着色した粘性係数が 3 種類（200, 1,000, 5,000mm<sup>2</sup>/s）異なるシリコーン油を用意し、粘性の違いによる流出の挙動を確認できるようにする。流下位置も実験を行なう際に変更できるように 7 点位置を検討した（図 3.2-5）。

三次元造形したペDESTAL模型上に流下し広がるシリコーン油の界面形状を可視化できるように複数の光学カメラを設置した。撮影箇所は、シリコーン油がノズルから流出する様子、床面に流下されたシリコーン油がサンプへ流入する様子、シリコーン油がスリット部へ流入しドライウェル床に流れ落ちる様子、及びサンプへ流入したシリコーン油がドライウェル床に流れ落ちる様子である。また、ドレンサンプピットとスリットへ流れ出る流出量を時間の関数として定量化するために二次元レーザー変位計及び微小重量計を設置した（図 3.2-5）。これらの計測器の仕様を表 3.2-2 にまとめる。

表 3.2-1：等温実験の実験パラメータ表

パラメータ	値
模擬熔融炉心	シリコーン油（黒着色）
粘性係数	200、1,000、5,000 mm <sup>2</sup> /s
流下量	20 g
流下質量速度（平均）	0.08 g/s ～ 0.30 g/s
流下位置	ペDESTAL中心等
縮尺	1/100, 1/50
液膜厚さ分布計測法	レーザー連続測長

表 3.2-2 : 計測器の仕様

超小型台はかり	
型式	PL-0.4L (東洋測器株式会社)
定格容量	400 g
定格出力	0.5 mV/V
小型デジタル指示計	
型式	TI-702 (東洋測器株式会社)
使用温度	-10~40 °C
電源	DC 24 V / 100 mA
質量	150 g
二次元レーザー変位計	
ヘッド部	
型式	LJ-V7300 (株式会社キーエンス)
設置状態	拡散反射
基準距離	300 mm
測定範囲	z 軸 ±145 mm X 軸 110 mm (NEAR 側) / 180 mm (基準距離) / 240 mm (FAR 側)
サンプリング周期	最速 16 $\mu$ s (高速モード)
コントローラ部	
型式	LJ-V7000 (株式会社キーエンス)
最小表示単位	0.1 $\mu$ m、0.00001 mm <sup>2</sup> 、0.01°
電源	DC 24 V
使用周囲温度	0~+50 °C

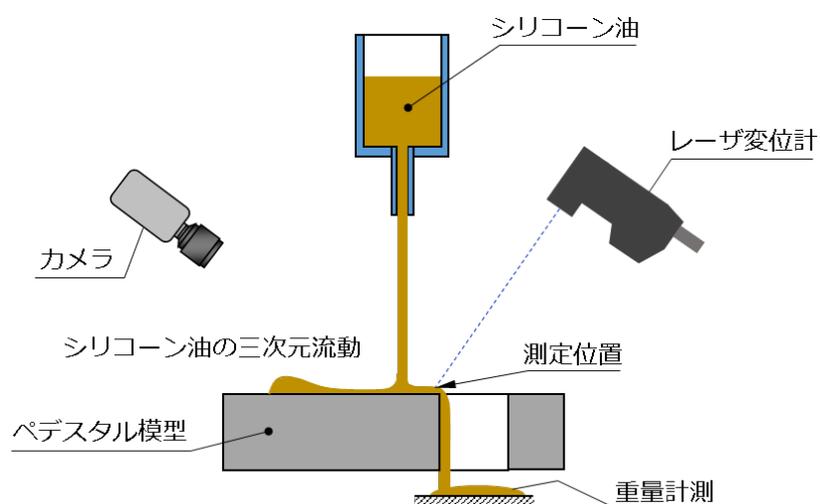


図 3.2-1 : 実験装置の構成

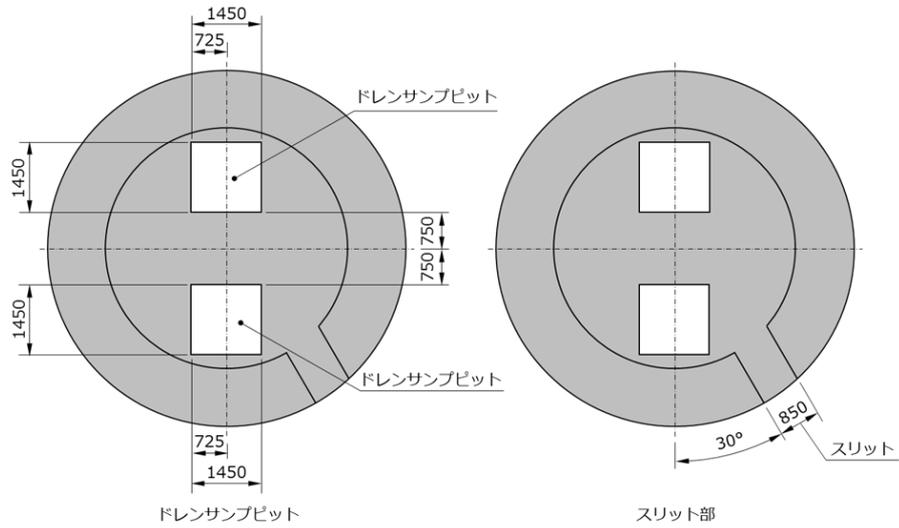
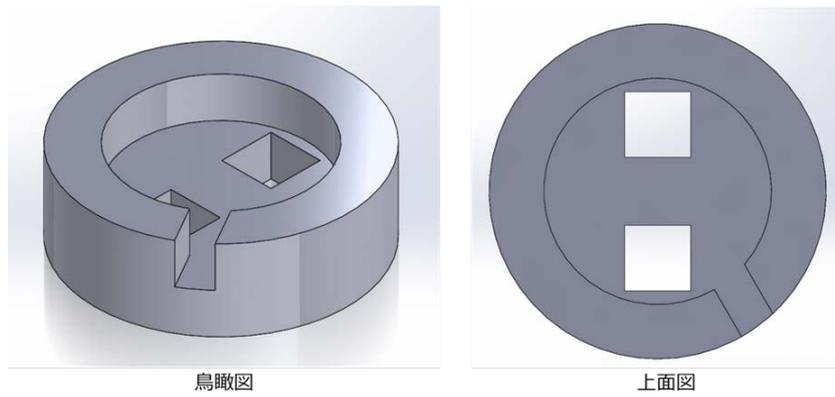


図 3.2-2 : 格納容器ペダスタルの構造



鳥瞰図

上面図

図 3.2-3 : ペダスタルの三次元 CAD 図

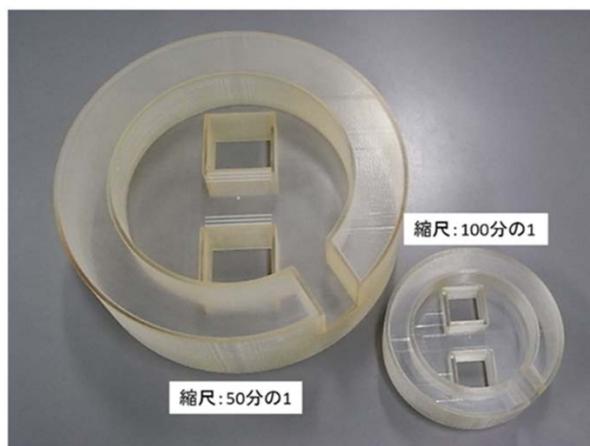


図 3.2-4 : 3D プリンタで製作したペダスタル模

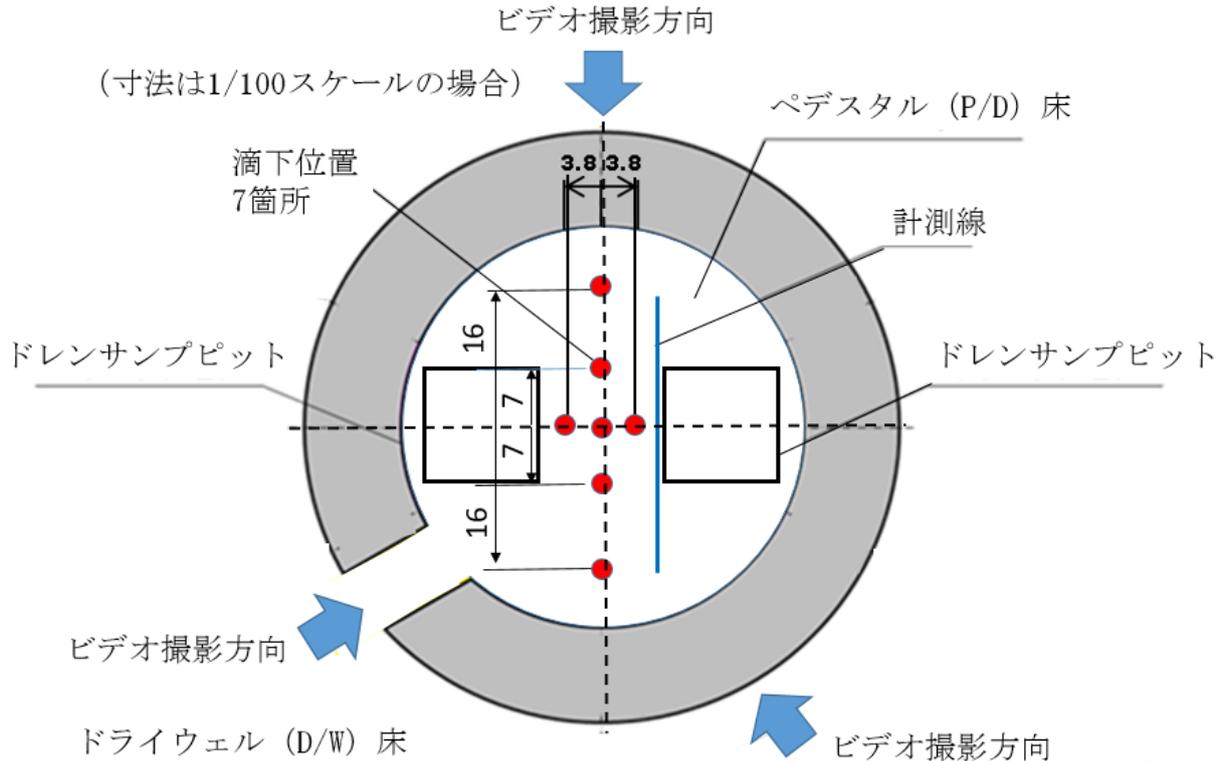


図 3.2-5 : 流下位置の検討 (寸法は 1/100 の場合)

### 3.2.1.2. 予備実験の実施

1/100 スケールのペDESTAL模型を使用した予備実験を行なった。平成 29 年度以降に MPS 解析の妥当性を確認するため、平成 28 年度は広範な流下位置 (図 3.2-5 に示した 7 箇所)、粘性 (動粘度 : 200、1,000、5,000  $\text{mm}^2/\text{s}$ )、ノズル径 (3mm、6mm) 等の実験条件に対応して流下データが取得できることを確認した。

予備実験により、粘性の異なるシリコーン油においては、ノズル径毎に質量流量を測定し、粘性によって質量流量の違いを確認した。ノズル外径 3mm、6mm のいずれの場合も粘性によって質量流量が異なる結果となった。粘性係数が 200  $\text{mm}^2/\text{s}$  と 1000  $\text{mm}^2/\text{s}$  では流下開始後すぐに質量流量が増え、粘性係数が 5000  $\text{mm}^2/\text{s}$  の場合は質量流量が経過時間に対して少しずつ増えた。実験においては、各粘性でシリコーン油の床面拡散挙動を比較する場合、質量流量の影響があることを考慮する必要があることを明らかにした。いずれの粘性のケースも衝突部の延長線上は液膜が薄く、横方向外縁では慣性力を失って水力跳躍により盛り上がっていた。また、粘性が高いと先行して細く拡がり、粘性が低いと最初は膜厚が厚いがその後薄く拡がった。このような光学観察と重量物時系列が得られることから、作製した装置及び実験体系が MPS 解析の妥当性確認に必要なデータを与えることができることを確認した。

### 3.2.2. 平成 29 年度の実施内容及び成果

平成 28 年度までに検討した実験パラメータと計測項目をもとに、実験装置を設置し、アブレーションを伴わない等温条件による模擬デブリ流下実験を行った。平成 28 年度の予備実験で使用した実験装置に対して、実験パラメータの変更については、ノズル部とチューブの変更、一定の流量を送液できるシリンジポンプの設置、又、測定項目については、二次元レーザー変位計の設置位置の変更、PC モニタ（台はかりの流出量）用の撮影ビデオカメラの設置を行った。実験は、実験パラメータをもとに、ペDESTAL 模型の大きさ、粘性係数、流下位置、濡れ性に対してパラメータを変えて実施した。なお、濡れ性は個別効果実験を実施し、濡れ性の効果を確認した。以下に平成 29 年度に実施した実験の実験装置、実験条件、実験結果について示す。

#### 3.2.2.1. 実験パラメータと計測項目

##### (1) 実験パラメータ

平成 28 年度に構築した BWR Mark-I 型格容器ペDESTAL を模した実験体系を対象に、平成 29 年度は MPS 解析結果の妥当性の検証として、熔融物による床構造のアブレーションを伴わない等温条件で実験を行った。必要な実験パラメータは、平成 28 年度に定めた予備実験の結果を踏まえて以下の検討を行った。

平成 29 年度に実施した計測項目を表 3.2-3 に示す。実験に使用するペDESTAL 模型は 1 ケースの実験にかかる時間を考慮して、100 分の 1 の小さいモデルを基本とした。50 分の 1 の大きいモデルは、粘性係数の高い  $5000\text{mm}^2/\text{s}$  の 1 ケースとし、流下挙動の可視化データを取得することとした。

流下位置は図 3.2-6 に示す 4 点とした。平成 28 年度に構築した実験体系では 7 点を計画していたが、図 3.2-6 に示すペDESTAL の中心を除く中心線上の点は左右対称となるため、サンプルピットへ流出しにくい流下位置の 3 点を除いた。粘性係数は、50, 200, 1000,  $5000\text{mm}^2/\text{s}$  の 4 水準とした。又、ノズルの膨張を抑制するために 6mm のアルミパイプを用いた。途中のチューブについても肉厚 (1mm) が厚いテフロンチューブにすることで膨張を抑制し流量が変化しないようにした。このようにして流量は同じ量を流下できるパラメータとした。模擬デブリの落下高さは、シリコン油を落下させる際、ノズルの先端がペDESTAL 模型床面に触れないように、床面からノズル先端の高さを 10mm とした。濡れ性は別の個別効果実験により確認することとした。

表 3.2-3：模擬デブリ流下等温実験の実験パラメータ

パラメータ	員数	内容
ペDESTAL模型の大きさ	2	1/100 スケール：基本 1/50 スケール (5000mm <sup>2</sup> /s)
流下場所	4	4 点
粘性係数	4	50, 200, 1000, 5000 mm <sup>2</sup> /s
ノズル径	1	内径を 6mm とし、先端をアルミパイプ、途中部分を肉厚の厚いシリコンチューブに変更。
流量	1	途中のチューブの弾性により流量が変化しないように工夫
落下高さ	1	10mm
濡れ性	1	個別効果実験により確認

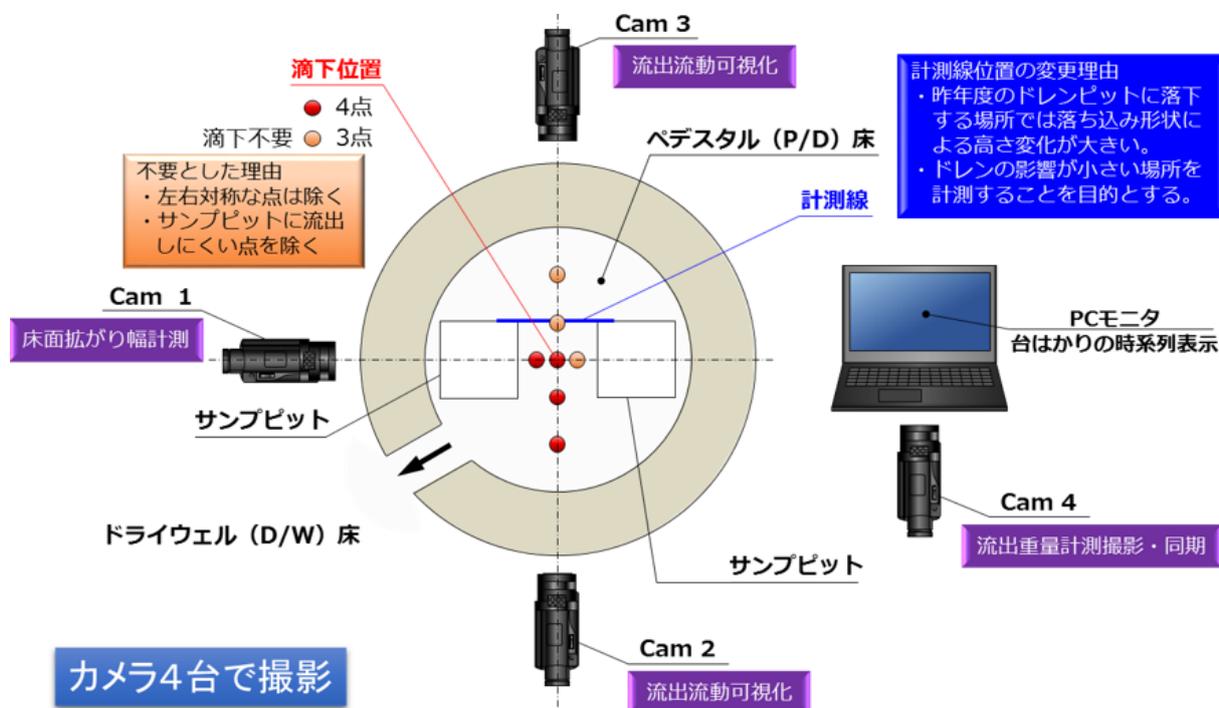


図 3.2-6：模擬デブリの流下位置の検討

## (2) 計測項目

平成 29 年度に実施した計測項目を表 3.2-4 に示す。計測項目は、二次元レーザー変位計による液膜厚さ分布の時系列、ビデオカメラによるサンプルピットに落ちない模擬デブリの床面上の先端間隔の時系列、流出流動の可視化、PC モニタ上の台はかりの時系列表示、及び台はかりによるサンプルピット流出量の時系列とした。

図 3.2-6 に示したように、二次元レーザー変位計による計測線位置は、平成 28 年度の予備実験の結果から位置を変更した。予備実験ではサンプルピットに落下する場所を計測位置としていたが、模擬デブリがサンプルピットに流出する際、落ち込み形状による高さ変化が大きいことから、

サンプルピットへの落下の影響が小さい場所を計測線位置とした。ビデオカメラは4台使用し、1台（Cam1）は床面広がり幅計測用にサンプルピットの並びが垂直方向になるようにビデオカメラを設置し、左右のペDESTAL床面床面上に模擬デブリが広がる様を計測できるようにした。模擬デブリがサンプルピットへ流出する流動は、サンプルピットが左右に位置するようにカメラ位置を設定し、ペDESTAL模型の前後に2台のビデオカメラ（Cam2、Cam3）を配置して計測できるようにした。4台目のビデオカメラ（Cam4）は、台ばかりで計測する模擬デブリのサンプルピットへの流出量をPCモニタ上に表示させ時系列で流出量に変化するさまを撮影するようにした（図 3.2-6 参照）。

表 3.2-4：模擬デブリ流下実験の計測項目

計測機器		計測項目
2次元レーザー変位計		液膜厚さ分布の時系列
ビデオカメラ	Cam1	サンプルピットに落ちない模擬デブリの床面上の先端間隔（広がり幅）の時系列
	Cam2	流出流動の可視化
	Cam3	流出流動の可視化
	Cam4	PCモニタ上の台ばかりの時系列表示
台ばかり	1	サンプルピット流出量の時系列
	2	
	3	

### 3.2.2.2. 実験装置

実施した模擬デブリ流下実験の実験装置の概要を図 3.2-7 に示す。流下口のノズルにシリコーン油を送り込むためのシリンジポンプを含めた構成を図 3.2-8 に示す。シリンジポンプには、NEXUS6000（型式：CXN1070）を使用し、シリンジにはテルモ製の50mlシリンジを用いた。シリンジポンプにシリコーン油を入れた50mlシリンジを取り付け、シリンジ先端から内径7mm（外径9mm、肉厚1mm）のシリコーンチューブを介して、流下口のアルミパイプ（内径6mmのノズル）から流下できるようにした。シリコーンチューブは、シリンジからアルミパイプまでを水平に保つように設置し、模擬デブリが自重で落下しないようにした。又、シリコーンチューブの周囲をビニールテープで巻くことでチューブの弾性により流量が変化しないように工夫した。

台ばかりで計測した流出流量の計測については、台ばかりのログ画面をPCのモニタ上に表示させ、モニタの前にカメラを設置し撮影し、サンプルピットへ流出した模擬デブリの重量を時系列で記録できるようにした。二次元レーザー変位計による計測部の概要を図 3.2-9 に示す。模擬デブリの流下をアルミパイプとシリコーンチューブを使用することで、レーザーが接触することなく二次元レーザー変位計を計測線の真上に設置できるようになった。上記内容で設置した実験装置の外観写真を図 3.2-10 に示す。

装置仕様	
・ペDESTAL模型	1/100, 1/50モデル
・滴下場所	4点
・ノズル径	内径6mm (先端アルミパイプ、途中シリコンチューブ)
・落下高さ	10mm
・シリンジポンプ	NEXUS6000 (型式: CXN1070)
・2次元レーザー変位計	ヘッド: LJ-V7300 コントローラー: LJ-V7000 (液膜厚さ分布の時系列計測)
・台はかり	PL-0.4L (流出量の時系列計測)
・デジタル指示計	TI-702
・ビデオカメラ	Cam1: サンプルピットに落ちない方向の 床面上の先端間隔時系列計測 Cam2: 流出する流動の可視化 Cam3: 流出する流動の可視化 Cam4: 台はかりログ画面撮影

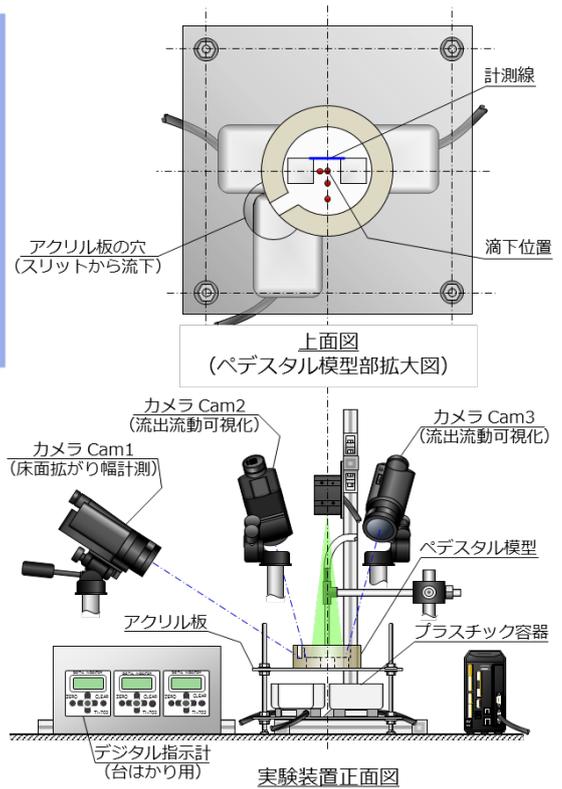


図 3.2-7: 模擬デブリ流下等温実験の実験装置概要

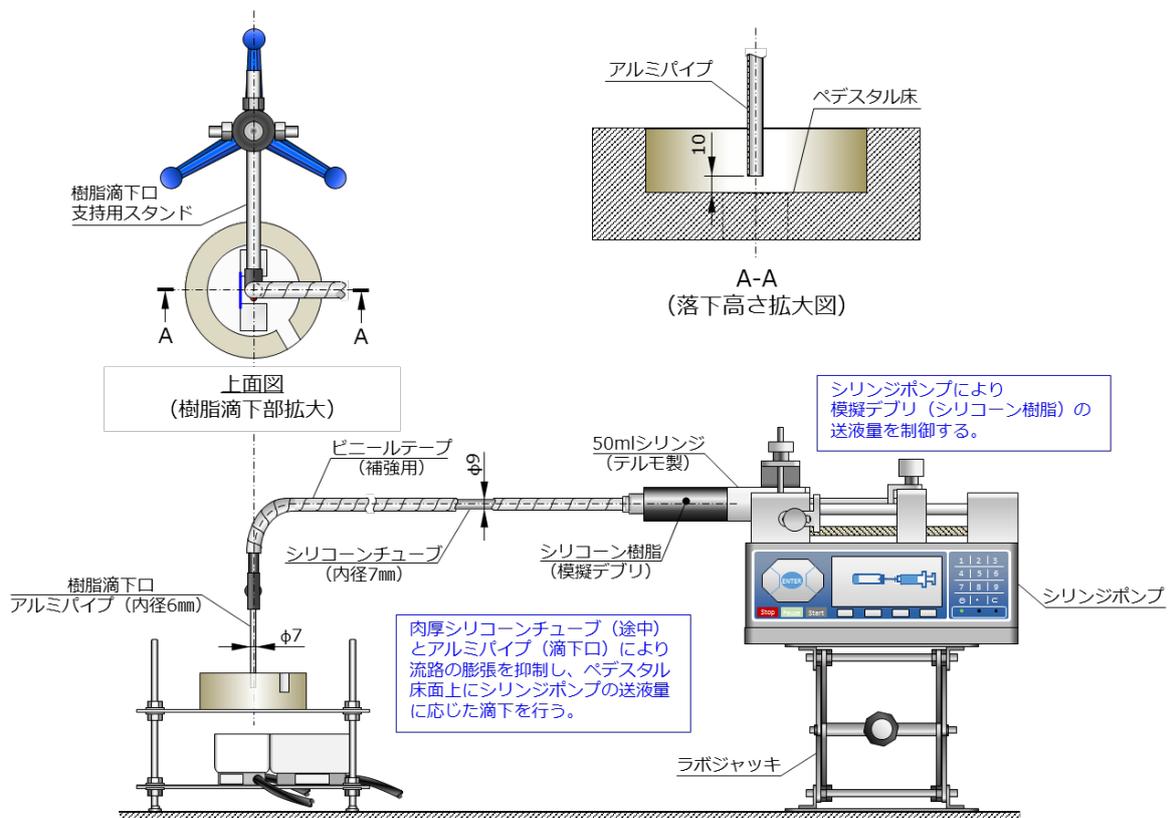


図 3.2-8: シリンジポンプによるシリコン油流下詳細図

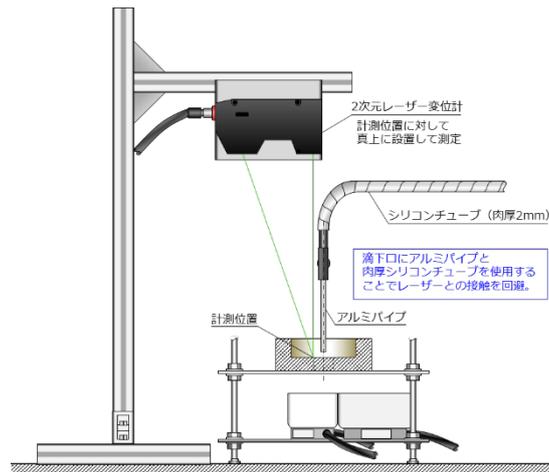


図 3.2-9：二次元レーザー変位計による計測部の概要



図 3.2-10：模擬デブリ流下実験の実験装置の外観写真

### 3.2.2.3. 実験条件

平成 29 年度に実施した模擬デブリ流下実験のケース名称と実験パラメータの関係を表 3.2-5 にまとめる。実験パラメータは模型縮尺 (01 : 1/100 スケール、02 : 1/50 スケール)、粘性係数 (0010 : 10mm<sup>2</sup>/s、0050 : 50 mm<sup>2</sup>/s、0200 : 200 mm<sup>2</sup>/s、1000 : 1000 mm<sup>2</sup>/s、5000 : 5000 mm<sup>2</sup>/s)、流下位置、濡れ性 (N : 調整無し) とした。流下位置の名称については、C0 : 中心、W1 : 西側、S1 : 南側 1 (中央寄り)、S2 : 南側 2 (遠い側) とし、ペDESTAL 模型上での流下位置を図 3.2-11 に示す。

実験条件は、実験パラメータをもとに表 3.2-6 に示す 9 ケースとした。実機の 1/100 スケール、粘性係数を 5000 mm<sup>2</sup>/s、濡れ性を調整無しとして、流下位置 (C0、W1、S1、S2) の違いによる比較の実験を 5 ケース行った。粘性係数の違いによる比較としては、実機の 1/100 スケール、流下位置を S2 : 南側 2 (遠い側)、濡れ性を調整無しとして、粘性係数を 50 mm<sup>2</sup>/s、200 mm<sup>2</sup>/s、1000 mm<sup>2</sup>/s (5000mm<sup>2</sup>/s は上記流下位置の違いで実施) で実験を 3 ケース行った。

本実験ではスケール効果を確認するために、基本ケースの実験体寸法を 2 倍とした実験体を作成した。スケール効果の確認としては、(1) 寸法を変えても同一流動を再現するために、レイノルズ数 (慣性力の無次元化) やキャピラリー数 (表面張力の無次元化) を一致させるべく流体や流動条件を変更する方法と、(2) 縮尺の変化を観察するために、寸法や境界条件を同倍数でスケールする方法がある。前者は実現象を正確に模擬して流動を再現するために用いられる手法である。後者は縮尺の効果が何処に発現するか、どの程度の差となるかを観察することで縮小 (又は拡大) 実験の限界を把握するために用いられる手法である。本研究では MPS 法で考慮すべき接触角や表面張力が流動に与える影響を把握するために、後者を選択し、縮尺の変化が流下流動に与える影響を把握することを目的とする。共通条件として、粘性係数を 5000 mm<sup>2</sup>/s、流下位置を S2 : 南側 2 (遠い側)、濡れ性を調整無しとして、実機の 1/50 スケールに変更した実験を 1 ケース行った。シリコーン油の流下速度については、1/100 スケールでは 40ml/min. (ただし、ケース名 01500S2N180215 のみ 20ml/min. とした)、1/50 スケールでは 160ml/min. とし、それぞれ 30 秒間流下させた。

表 3.2-5 : 模擬デブリ流下実験のケース名称と実験パラメータの関係

模型縮尺	粘性係数	流下位置	濡れ性	日付
01:1/100	0050:50mm <sup>2</sup> /s	C0:中心	N:調整無し	YYMMDD
02:1/50	0200:200mm <sup>2</sup> /s	W1:西側 1		
	1000:1000mm <sup>2</sup> /s	S1:南側 1(中央寄り)		
	5000:5000mm <sup>2</sup> /s	S2:南側 2(遠い側)		

表 3.2-6 : 模擬デブリ流下実験の実験条件表

No	模型縮尺	粘性係数	流下位置	流量	濡れ性	ケース名
1	01:1/100	5000mm <sup>2</sup> /s	C0: 中心	40ml/min	N:調整無し	015000C0N180228
2	01:1/100	5000mm <sup>2</sup> /s	S2:南側2 (遠い側)	40ml/min	N:調整無し	015000S2N171220
3	01:1/100	5000mm <sup>2</sup> /s	W1:西側1	40ml/min	N:調整無し	015000W1N171221
4	01:1/100	5000mm <sup>2</sup> /s	S1:南側1 (中央寄り)	40ml/min	N:調整無し	015000S1N171222
5	01:1/100	1000 mm <sup>2</sup> /s	S2:南側2 (遠い側)	40ml/min	N:調整無し	011000S2N180220
6	01:1/100	200mm <sup>2</sup> /s	S2:南側2 (遠い側)	40ml/min	N:調整無し	010200S2N180117
7	01:1/100	50mm <sup>2</sup> /s	S2:南側2 (遠い側)	40ml/min	N:調整無し	010050S2N180118
8	01:1/100	5000mm <sup>2</sup> /s	S2:南側2 (遠い側)	20ml/min	N:調整無し	015000S2N180215
9	02:1/50	5000mm <sup>2</sup> /s	S2:南側2 (遠い側)	160ml/min.	N:調整無し	025000S2N180302

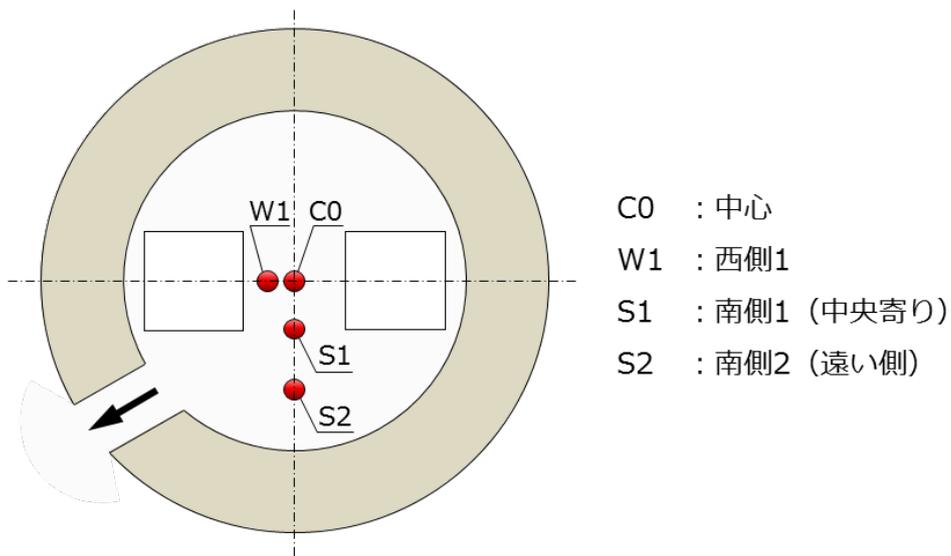


図 3.2-11 : 模擬デブリ流下実験の溶融物流下位置と名称

#### 3.2.2.4. 実験結果

表 3.2-6 の実験条件表に基づいて模擬デブリ流下実験を行った。各実験条件での結果は実験ケース毎に以下のようにまとめた。このとき、東側サンプルピットをサンプルピット A、西側サンプルピットをサンプルピット B（ドライウエル出入口に近いサンプルピット）とした。

- ・流動観察結果（静止画像）
- ・断面形状のスナップショット
  - “0 sec” は流下開始時刻、“Distance” は模型の東側を+、西側-としてグラフを作成。
- ・溶融物の厚さ分布の時間変化
- ・溶融物の流出流量の時間変化

例として、流下位置 S1 の実験 No. 4（ケース名：015000S1N171221）の流動観察結果、溶融物断面形状のスナップショット、溶融物高さ分布の時間変化、溶融物流出重量の時間変化をそれぞれ図 3.2-12、図 3.2-13、図 3.2-14、図 3.2-15 に示す。

表 3.2-6 にまとめた実験条件表に基づいて実施した実験の流動観察結果から実機の 1/100 スケール、粘性係数 5000 mm<sup>2</sup>/s、濡れ性調整無しでの流下位置による違いを確認できた。流下位置 C0：中心ではサンプルピット A、B からの流下と床面全体へ広がり、流下位置 S2：南側 2 では流下したシリコーン油が床面に広がってからサンプルピット A、B から流下するが、反対側の床面までは広がらなかった。流下位置 W1：西側 1 では、W1 がサンプルピット B のすぐ傍であることから、最初サンプルピット B から流下、その後サンプルピット A から流下し、床面全体へ広がっている。流下位置 S1：南側 1 では床面とすぐ傍のサンプルピット A、B から流下し、その後反対側の床面へ流れていくが全体に広がりきれなかった。又、実機の 1/100 スケール、流下位置 S2：南側 2、濡れ性調整無しでの粘性係数による違いについても確認できた。粘性係数が高いと、流下後床面に広がり、サンプルピット A、B から流下し、反対側の床面には広がりきれないが、粘性係数が低くなると、流下直後より早く床面に広がり、サンプルピット A、B から流下する。又、反対側床面全体にも流れていく。

計測結果をから流下したシリコーン油の断面形状については、模型の東西の中心部が高くなっているが、粘性が低くなると断面高さも低くなっている。流出重量については、流下位置が W1 の場合、サンプルピット A、B に大きな差が出ている。

実機の 1/50 スケールについては、流下位置 S1 であることから 1/100 スケールの流動観察と同様に床面への広がりと同じ傍のサンプルピット A、B から流下し、その後反対側の床面へ流れていくが全体に広がりきれなかった。又、断面形状も厚さ分布もほぼ同じであった。サンプルピットへの流出流量については、流出量の違いから（1/100 スケールは 40ml/min.、1/50 スケールは 160ml/min.）、1/50 スケールの流出量が多く出ている結果を得た。

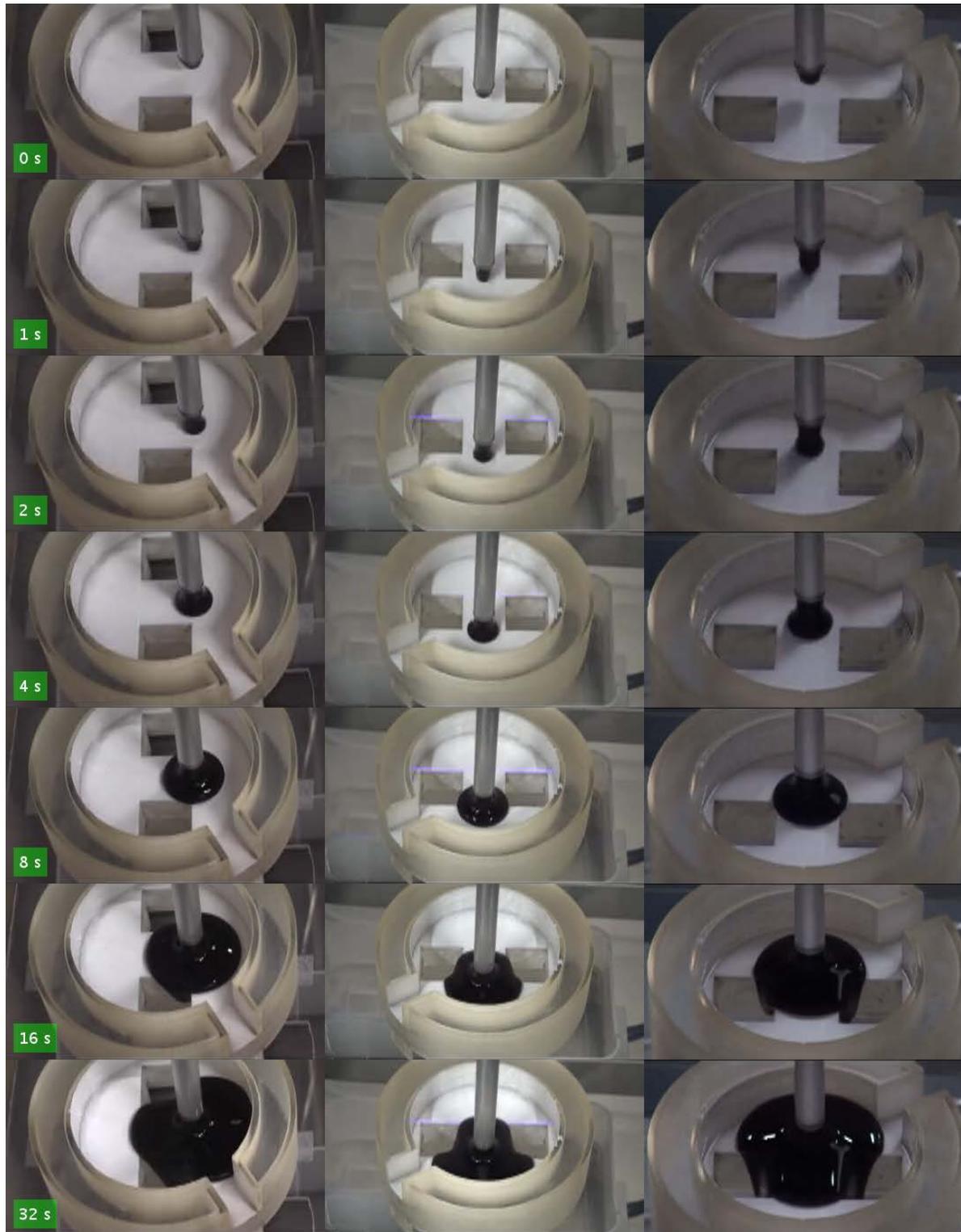


図 3.2-12 : 模擬デブリ流下実験の流動観察結果 (1/100 スケール、流下位置 S1、粘性係数  $5000\text{mm}^2/\text{s}$ )

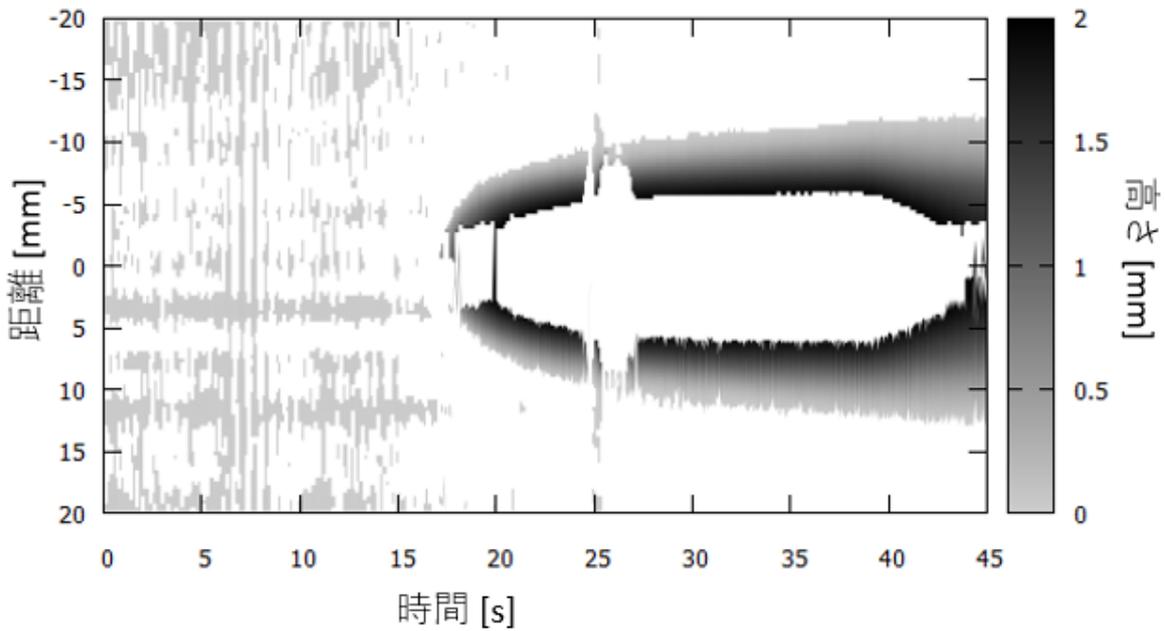


図 3.2-13：模擬デブリ流下実験の溶融物断面形状の時間進展（1/100 スケール、流下位置 S1、粘性係数  $5000\text{mm}^2/\text{s}$ ）

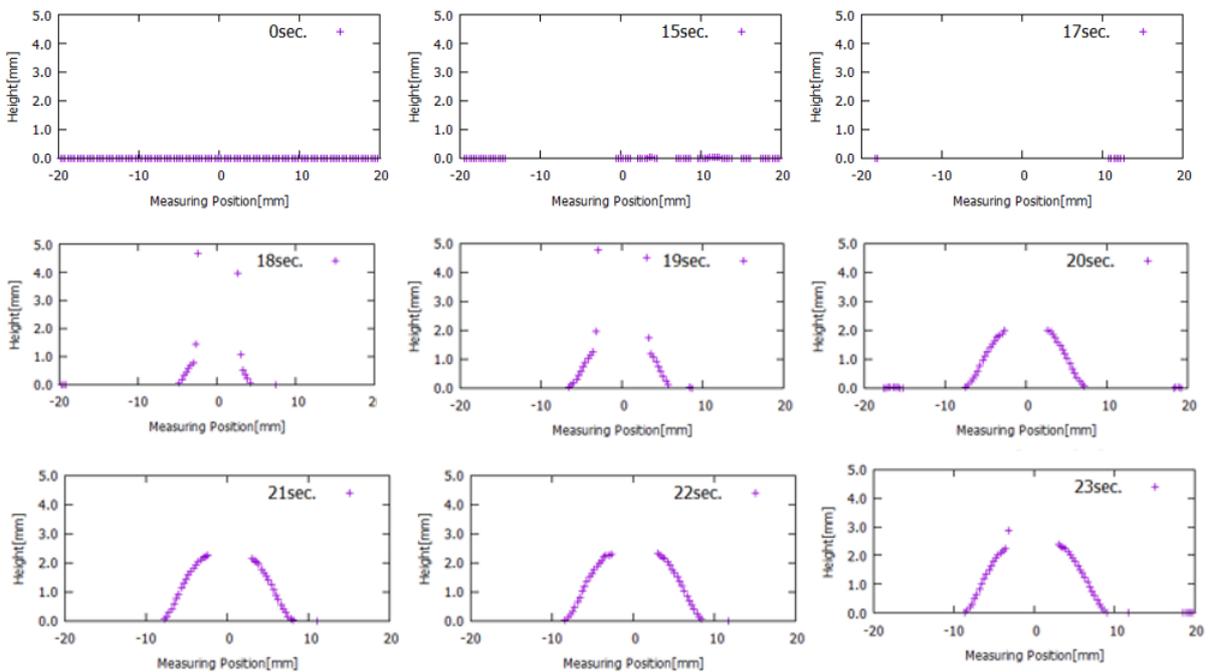


図 3.2-14：模擬デブリ流下実験の溶融物高さ分布の時間変化（1/100 スケール、流下位置 S1、粘性係数  $5000\text{mm}^2/\text{s}$ ）

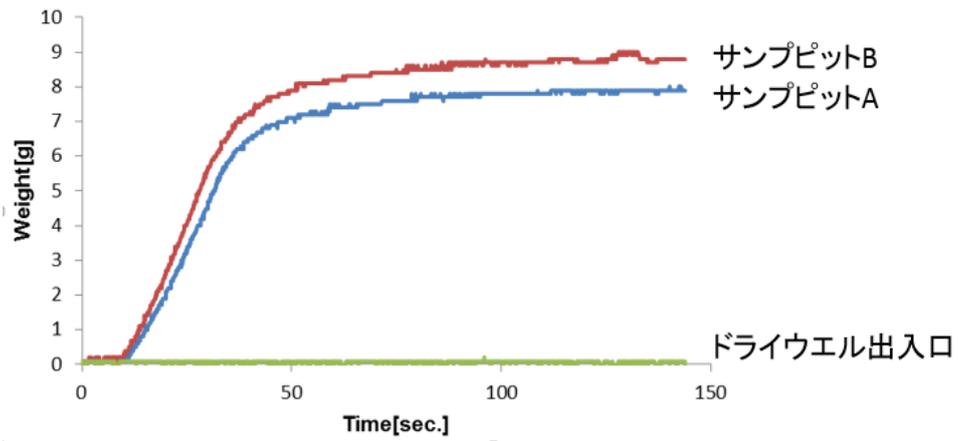


図 3.2-15 : 模擬デブリ流下実験の溶融物流出重量の時間変化 (1/100 スケール、流下位置 S1、粘性係数  $5000\text{mm}^2/\text{s}$ )

### 3.2.3. 平成 30 年度の実施内容及び成果

平成 30 年度は、MPS 解析結果の妥当性の検証のために、平成 29 年度で実施したものと同様の条件で、BWR Mark-I 型格納容器の形状を模した床材に融点の低い材料を用い、床材のアブレーションを伴う模擬デブリ流下実験を行った。本実験を行うにあたり、床材に使用する材料のアブレーションの確認を行った。表面粗さの異なるパラフィン板に高温のシリコン油を流下させ、パラフィン材をアブレーションさせながら流下する流動可視化結果が MPS 法による解析の妥当性確認に十分使用可能であることを確認した。また、高温のシリコン油は坩堝から自然流下させる流量を定量化するために、坩堝に入れるシリコン油のチャージ量をパラメータとして変化させて流量曲線を取得し、チャージ量毎の流下速度（時間当たりの流量：g/min）を把握して実験パラメータの選定を行った。このような確認を経て本実験は、アブレーションを確認したパラフィン材でペダスタル模型を製作し、選定した流下速度で加熱したシリコン油を坩堝からペダスタル模型床材に自然流下させて行った。

#### 3.2.3.1. 床材アブレーションの確認とシリコン油の流量曲線の確認

##### (1) 床材アブレーションの確認

BWR Mark-I 型格納容器の形状を模した床材に使用する融点の低い材料としてパラフィン材を検討した。パラフィン材には表面粗さの異なる材質があることから、常温のシリコン油を傾かせたパラフィン板に流下させて表面粗さと傾き角度の影響を確認し、よりアブレーションが起き易い条件を検討し、傾き角度 10° の表面が滑らかなパラフィン板の上に初期温度 100°C のシリコン油を流下させてパラフィン板のアブレーションを確認した。

図 3.2-16 に初期温度 100°C のシリコン油を 10° 傾かせたパラフィン板へ流下させる実験装置の概要を示す。シリコン油の初期温度を 100°C に設定するため、カーボン製の坩堝を製作し、ラバーヒーターと断熱材を巻いて加熱できるようにした。また、坩堝の底面には加熱したシリコン油を自然流下できるようにノズルを取り付けた。図 3.2-17 に坩堝内シリコン油の流下方法を示す。ノズル栓をした坩堝にシリコン油を入れラバーヒーターで加熱、100°C に達したところでノズル栓を引き抜き加熱したシリコン油を流下させた。シリコン油を初期温度 100°C に加熱、流下させることでパラフィン板のアブレーションを確認できた。また、シリコン油の流下重量は常温に比べ初期温度 100°C のほうが多くなっていることから、シリコン油の温度が高くなると流下速度も速くなることが分かった。

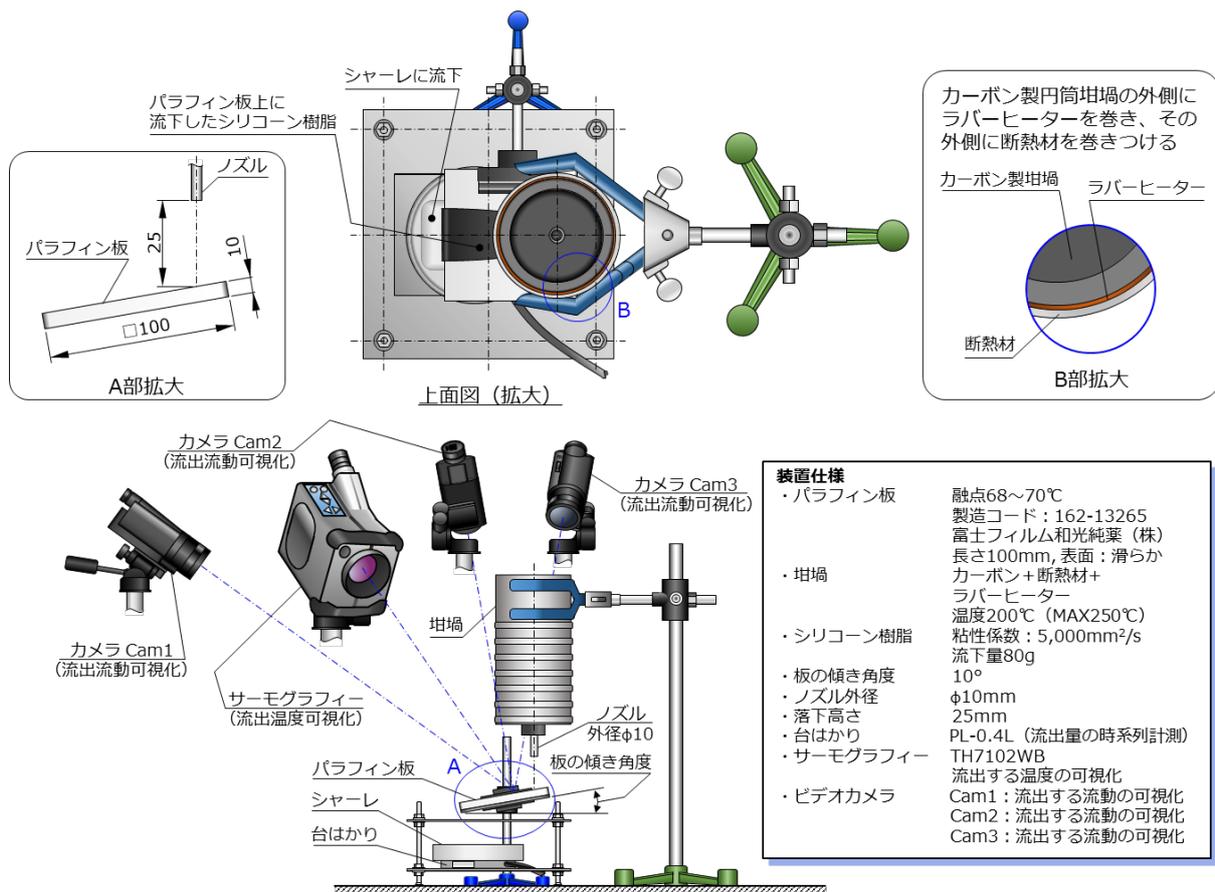


図 3.2-16 : シリコン油によるパラフィン板のアブレーション確認 (実験装置概要)

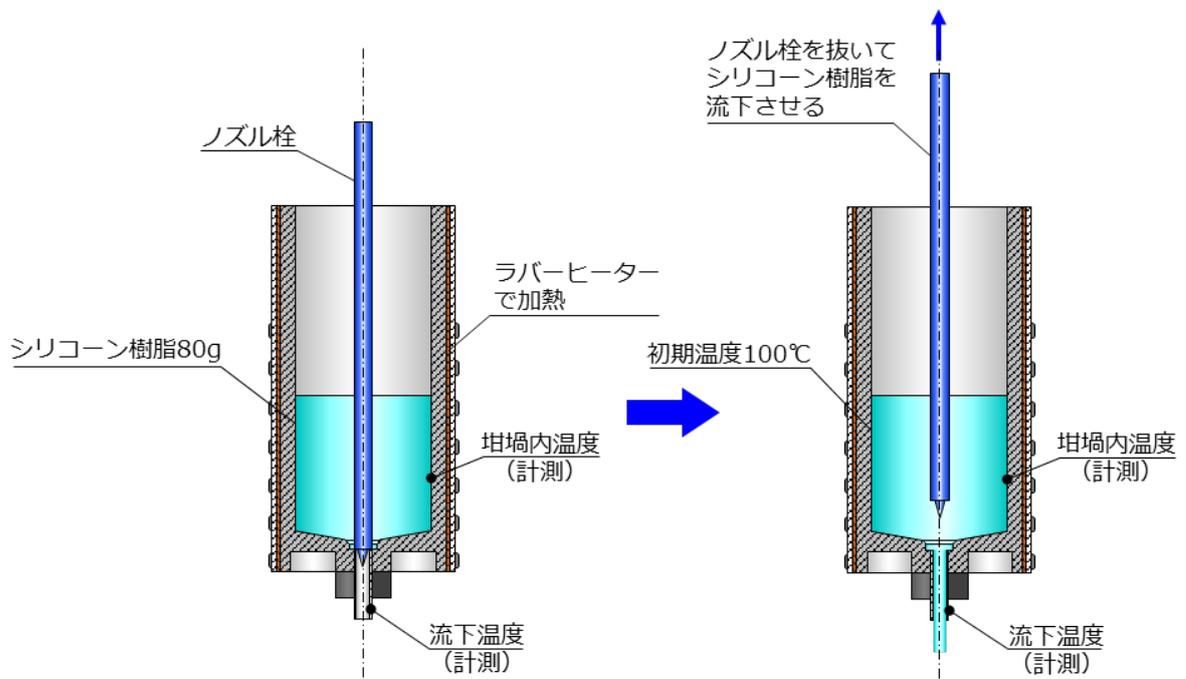


図 3.2-17 : 坩堝内シリコン油の流下方法

## (2) シリコン油の流量曲線の確認

加熱したシリコン油は坩堝を用いて流下させることから、坩堝へのチャージ量と流下速度を把握するため、坩堝から自然流下させて流量曲線の確認を行った。図 3.2-18 に実験装置の概要を示す。坩堝にシリコン油を入れ、ラバーヒーターで 110°C に加熱した後、ノズル栓を抜いてシリコン油をビーカーへ自然流下させ流下重量を測定した。図 3.2-19 は粘性係数 5000 mm<sup>2</sup>/s のシリコン油を坩堝に 20g チャージした場合の流量曲線、図 3.2-20 は 280g チャージした場合の流量曲線を示す。チャージ量が 20g の場合、測定開始からシリコン油が一定の流速で流下し、30 秒で重量が約 14g であることから流下速度は約 28 g/min となる。同様にチャージ量が 280g の場合は、流下速度は約 95 g/min となった。これによりチャージ量と流下速度の関係を確認できた。

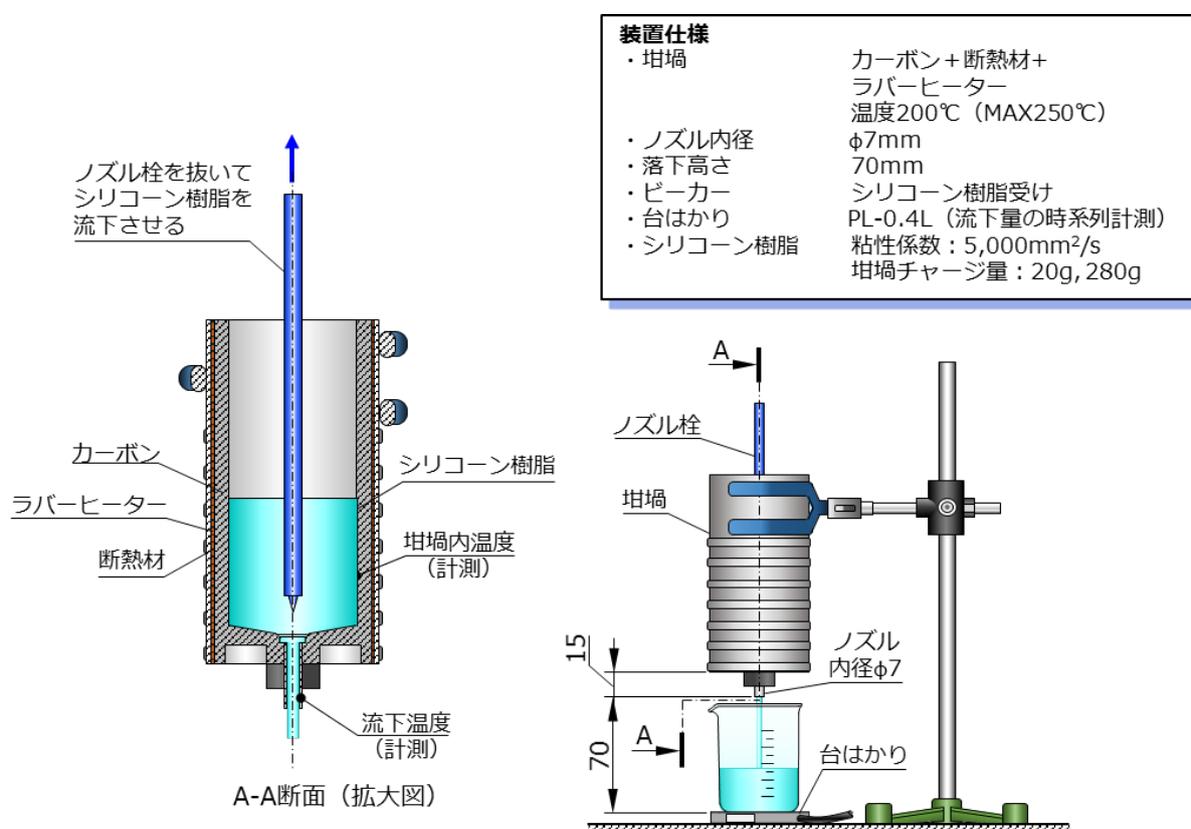


図 3.2-18 : シリコン油の流量曲線の確認 (実験装置概要)

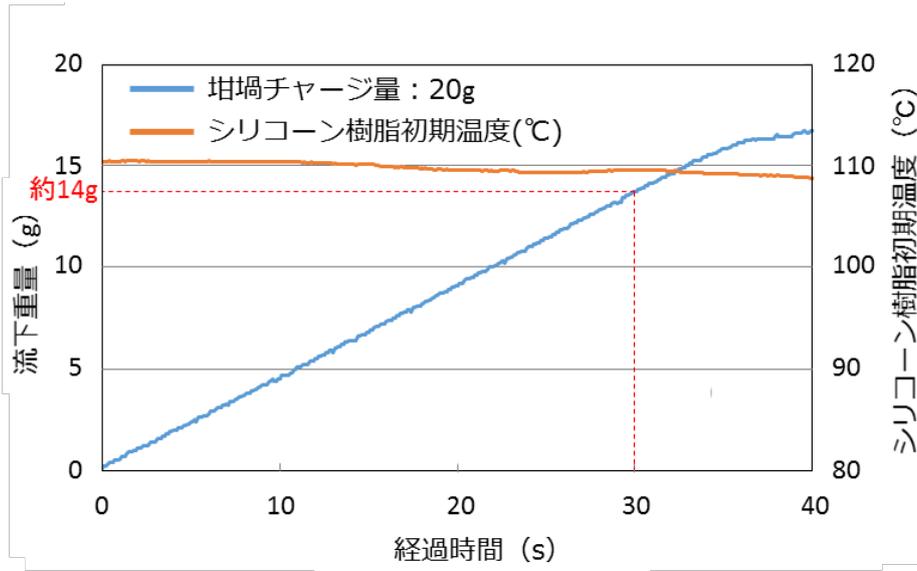


図 3.2-19：シリコン油の流量曲線（坩堝チャージ量 20g）

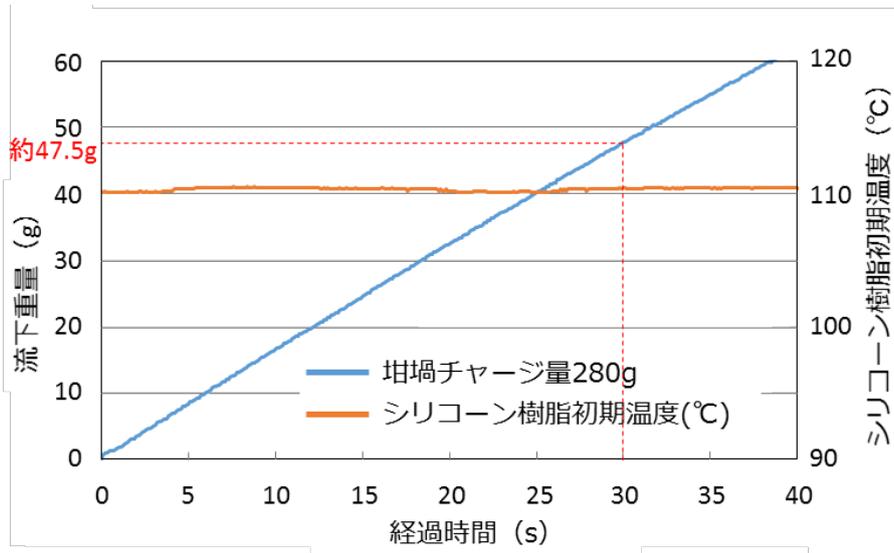


図 3.2-20：シリコン油の流量曲線（坩堝チャージ量 280g）

### 3.2.3.2. 実験パラメータと計測項目

#### (1) 実験パラメータ

平成 30 年度に実施した実験パラメータを表 3.2-7 に示す。実験に使用するペDESTAL 模型は 1 ケースの実験にかかる時間を考慮して 100 分の 1 スケールのモデルとし、パラフィン材で製作した。シリコン油の動粘度は平成 29 年度の実験と同じ  $5000 \text{ mm}^2/\text{s}$  の 1 ケースとし、ペDESTAL 模型の床の浸食を伴う流下挙動の可視化データを取得することとした。流下位置は平成 29 年度の実験と同様に図 3.2-21 に示す 4 点としている。ノズルは、内径 7mm、先端を金属製にすることで膨張を抑制し流量が変化しないようにした。流量は、3.2.3.1 項で求めた流量曲線をもとに自然流下で 20 g/min、40 g/min、80 g/min の 3 水準となるように坩堝内へのシリコン油のチャージ量を決めた。シリコン油の初期温度は、流下開始時の温度を初期温度とし 110°C、

125℃、140℃の3水準とし、異なる温度によるパラフィン材のアブレーションへの影響を確認できるようにした。シリコン油の落下高さについては、ノズルの先端がペDESTAL模型床面に触れないように、床面からノズル先端の高さを8mmとした。

表 3.2-7：アブレーションを伴う模擬デブリ流下実験の実験パラメータ

パラメータ		員数	内容
ペDESTAL 模型	大きさ	1	1/100 モデル
	材質	2	パラフィン：融点 68～70℃ 製造コード：162-13265（富士フィルム和光純薬（株））
流下場所		4	4点（平成29年度と同じ）
シリコン油 粘性係数		1	5000 mm <sup>2</sup> /s 製品名：Element14* PDMS 5K-J（Momentive 社製）
ノズル径		1	内径 7mm
流量		1	20 g/min, 40 g/min, 80 g/min 自然流下（流量が変化しない時間帯を抽出）
初期温度			110℃, 125℃, 140℃
落下高さ		1	8mm

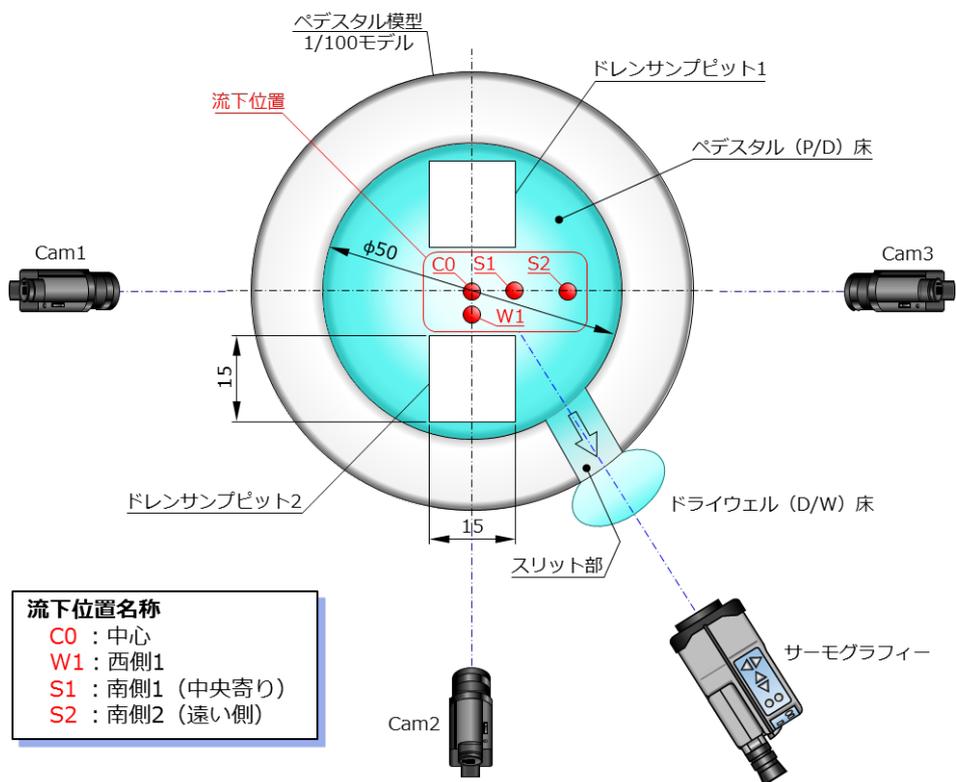


図 3.2-21：シリコン油の流下位置（アブレーション有り）

## (2) 計測項目

計測項目を表 3.2-8 に示す。計測項目は、ビデオカメラによる流出するシリコーン油流動の可視化、サーモグラフィによる流出するシリコーン油温度の可視化、及び台はかりによるサンプルピット流出量の時系列とした。流出流動を可視化するビデオカメラは3台使用した。1台 (Cam1) は、ドレンサンプルピットの並びが垂直方向になるように配置し、反対側に2台目 (Cam3) 設置して流下したシリコーン油が床面上とドレンサンプルピット部を流れる際に起きるアブレーションを観察できるようにした。Cam1、Cam3 の可視化に対して真横から観察できるように、3台目 (Cam2) のビデオカメラはドレンサンプルピットの並びに対して一直線上に設置した。流出する温度を可視化するサーモグラフィは、ペDESTAL模型のスリット側から Cam2、Cam3 に対して斜めに設置し流下したシリコーン油の温度を観察できるようにした。台はかり 1、2、3 は、それぞれ受け皿となる容器を分けてドレンサンプルピット 1、2 及びスリット部から流下したシリコーン油の流下重量を時系列で計測できるようにした。

表 3.2-8 : アブレーションを伴う模擬デブリ流下実験の計測項目

計測機器		計測項目
ビデオカメラ	Cam1	流出流動の可視化
	Cam2	流出流動の可視化
	Cam3	流出流動の可視化
サーモグラフィ		流出するシリコーン油の温度の可視化
台はかり	1	ドレンサンプルピット流出量の時系列
	2	
	3	
レーザー変位計		パラフィン模型の変化量

### 3.2.3.3. 実験装置

床材のアブレーションを伴う模擬デブリ流下実験の実験装置は、図 3.2-16 に示した装置のパラフィン板を模擬ペDESTAL床に置き換えたものである。図 3.2-22 は実験装置の上面図である。シリコーン油を加熱、流下させるため、図 3.2-18 に示したものと同様の坩堝を使用した。坩堝はカーボン製で周囲にラバーヒーターを巻き、その上に断熱材を巻き付け、坩堝の底面には内径 7mm のノズルを取り付けて流下させる構造とした。坩堝の設置は、ノズル先端がペDESTAL模型床面に対し落下高さ 8mm となるようにした。また、坩堝及びノズル内部には熱電対を取り付け、坩堝内部のシリコーン油の温度を初期温度、ノズルを通過する際のシリコーン油の温度を流下温度として計測できるようにした。実験は、ノズルに栓をした状態で坩堝にシリコーン油を入れて加熱し、シリコーン油が初期温度に達したところでノズル栓を抜き、ペDESTAL模型床面に流下させた。

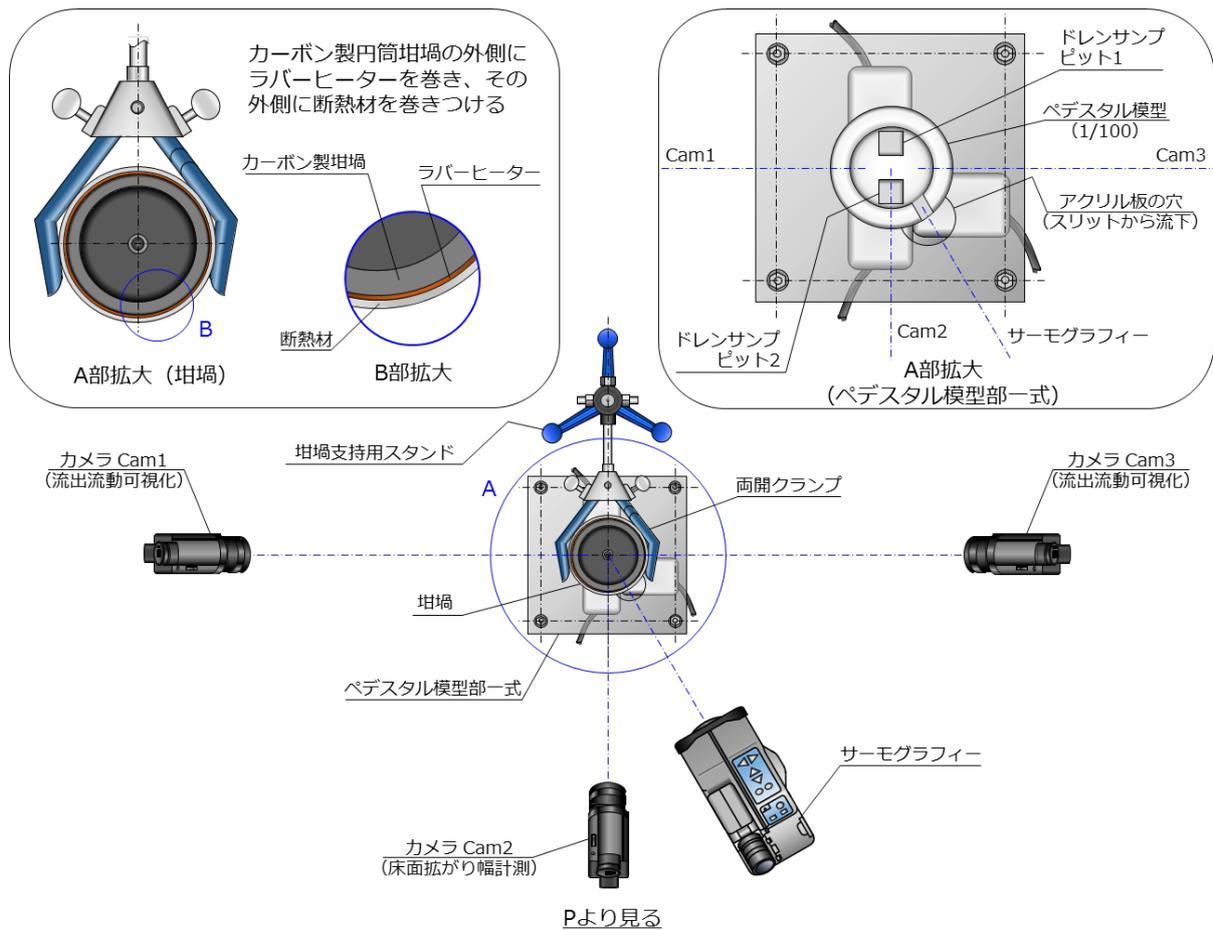


図 3.2-22 : アブレーションを伴う模擬デブリ流下実験装置の概要 (上面図)

### 3.2.3.4. 実験条件

3.2.2.3項で定めたものと同様に、実験パラメータによる実験ケース名を定めた。ケース名は粘性係数 (M 粘性係数)、落下量 (V 落下量)、初期温度 (T 温度)、流下位置 (C0 : 中心, W1 : 西側, S1 : 南側1 [中央寄り], S2 : 南側2 [遠い側]) で表し、例 : M5000V40T110C0 (粘性係数 5000 mm<sup>2</sup>/s , 流下流量 40 g/min, 初期温度 110°C, 滴下位置 : 中心) とした。

実験条件は、実験パラメータをもとに表 3.2-9 に示す 12 ケースとした。模型縮尺を 1/100、粘性係数を 5000 mm<sup>2</sup>/s として、流下流量 40 g/min におけるシリコーン油の初期温度 110°C での流下位置 (C0, W1, S1, S2) の違いによる比較の実験を 4 ケース、初期温度 125°C で流下位置 S2 の実験を 1 ケース、初期温度 140°C で流下位置 (C0, S2) の違いによる比較の実験を 2 ケース行った。流下流量 20 g/min においては、流下位置を S2 として初期温度 110°C、140°C の違いによる比較の実験を 2 ケース、流下流量 80 g/min においては、流下位置を S2 として初期温度 110°C、125°C、140°C の違いによる比較の実験を 3 ケース行った。

表 3.2-9：アブレーションを伴う模擬デブリ流下実験の実験条件表

No.	模型縮尺	粘性係数 (mm <sup>2</sup> /s)	初期温度 (°C)	流下位置	流下流量 (g/min)	実験名	実施日
1	1/100	5000	110	C0：中心	40	M5000V40T110C0	181024_1
2	1/100	5000	110	S1	40	M5000V40T110S1	181028_2
3	1/100	5000	110	S2	40	M5000V40T110S2	181024_2
4	1/100	5000	110	W1	40	M5000V40T110W1	181025_3
5	1/100	5000	125	S2	40	M5000V40T125S2	181102_1
6	1/100	5000	140	C0	40	M5000V40T140C0	181030_1
7	1/100	5000	140	S2	40	M5000V40T140S2	181101_1
8	1/100	5000	110	S2	20	M5000V20T110S2	181112_1
9	1/100	5000	140	S2	20	M5000V20T140S2	181112_2
10	1/100	5000	110	S2	80	M5000V80T110S2	181115_1
11	1/100	5000	125	S2	80	M5000V80T125S2	181116_3
12	1/100	5000	140	S2	80	M5000V80T140S2	181116_1

### 3.2.3.5. 実験結果

表 3.2-9 に示した実験条件表に基づいて模擬ペDESTAL床材のアブレーションを伴う模擬デブリ流下実験を行った。アブレーション量の分析には、溶液を張ったシャーレにペDESTAL模型を沈め重量と液位を測定し、校正試験結果からアブレーション量を推定する方法とレーザー変位計を用いてペDESTAL模型のアブレーション形状を測定する方法とした。

#### (1) アブレーション体積（質量）測定結果

先ず、シリコーン油流下前のペDESTAL模型を基準模型として、ドレンサンプルピット A 及び B の液位をレーザー変位計で測定し、平均値を算出した。次にシリコーン油流下後のアブレーションが起きたペDESTAL模型について、同様にドレンサンプルピット A 及び B の液位を測定し、平均値を算出した。基準模型からの液位の差を変化量として、実験ケースごとにまとめたものを表 3.2-10 に示す。

レーザー変位計による測定については、校正試験として溶液の注入量を変えて基準模型の液位を測定したデータと、シャーレ、ペDESTAL模型の形状寸法から求めた重量と液位の理論式との比較を行った（シャーレ、ペDESTAL模型の形状寸法からペDESTAL模型を溶液に沈めたときの液面の面積を算出し、溶液重量（g）と液位（mm）のグラフとなる理論式の傾きを求めた）。図 3.2-23 は、溶液の注入量を変えて基準模型の液位を測定した結果と、理論式から算出された結果を示す。レーザー変位計による測定から推定される重量とシャーレ、ペDESTAL模型の形状寸法から推定する重量がよく一致していることを確認できた。これらの校正試験の結果から、アブレーション量の推定を行った。表 3.2-10 に示した液位の変化量に算出した液面の面積を乗じて求めたアブレーション量を表 3.2-11 に示す。

例として実験ケース No. 1（ケース名：M5000V40T110C0）の実験時の流動観察結果を図 3.2-24 に示す。全 12 ケースの実験の流動観察結果から、模型縮尺 1/100、粘性係数 5000 mm<sup>2</sup>/s での初期温度、流下位置による違いを確認できた。流下流量 40 g/min、初期温度 110℃において、流下位置 C0:中心では、ドレンサンプピット 1、2 の中心の床面からアブレーションがおり、流下位置 S1：南側 1、流下位置 S2：南側 2 ではそれぞれの流下位置を中心に床面のアブレーションが起きた。流下位置 W1:西側では、流下位置がドレンサンプピット 2 に近いことからドレンサンプピットの縁部分でアブレーションが起き、そのままシリコン油が流下していることからペDESTAL 模型床面へのシリコン油の広がりも他の流下位置より小さくなった。流下流量 40 g/min、初期温度 125℃、流下位置 S2：南側 2 では、初期温度 110℃に比べシリコン油の温度が高いことからペDESTAL 模型床面のアブレーションがより深くなった。また、流下流量 40 g/min、初期温度 140℃では、流下位置 C0：中心の場合、ドレンサンプピット間の床面がさらに深くアブレーションが起き、流下位置 S2：南側 2 の場合、中心から離れた床面も大きくアブレーションが起きた。流下流量 20 g/min、流下位置 S2：南側 2 では、初期温度 140℃が初期温度 110℃に比べ床面のアブレーションが深く起きた。流下流量 80 g/min、流下位置 S2：南側 2 では、初期温度が 110℃、125℃、140℃と高くなるにつれて床面のアブレーションがより大きくなった。

シリコン油の流下重量の時間変化を計測した結果からは、MPS 解析結果の妥当性確認用のデータを取得することができた。粘性係数 5000 mm<sup>2</sup>/s、初期温度 110℃、流下流量 40 g/min のシリコン油をペDESTAL 模型床面の流下位置 S2：南側 2 に流下してから、ドレンサンプピット 1、2 並びに搬出口（ペDESTAL 模型のスリット部）への流出量を計測し、ドレンサンプピット 1、2 については時間経過に対してほぼ同じ流量で流出し、搬出口へはほとんど流出しない結果を得た（図 3.2-25 参照）。また、熔融物の温度の影響として、流下流量 80 g/min のシリコン油が流下位置 S2：南側 2 に流下する際、初期温度 110℃、125℃、140℃のシリコン油の流下重量を比較し、初期温度が高くなるとアブレーションが増大する結果を得た。（図 3.2-26 参照）

表 3.2-10：ペDESTAL 模型を溶液に沈めたときの液位の変化量

ペDESTAL 模型材質	流下流量 (g/min)	初期温度 (℃)	液位の変化量(mm)			
			C0	S1	S2	W1
パラフィン	20	110			-0.215	
		125				
		140			-0.440	
	40 (昨年度と同条件)	110	-0.626	-0.231	-0.046	-0.280
		125			-0.081	
		140	-0.322		-0.626	
	60	110			-0.010	
		125			-0.438	
		140			-0.791	

表 3.2-11 : アブレーション体積 (液面高さを変換)

ペDESTAL 模型材質	流下流量 (g/min)	初期温度 (°C)	アブレーション体積(mm <sup>3</sup> )			
			C0	S1	S2	W1
パラフィン	20	110			431	
		125				
		140			882	
	40 昨年度と 同条件	110	1254	463	92	561
		125			162	
		140	645		1254	
	80	110			20	
		125			878	
		140			1585	

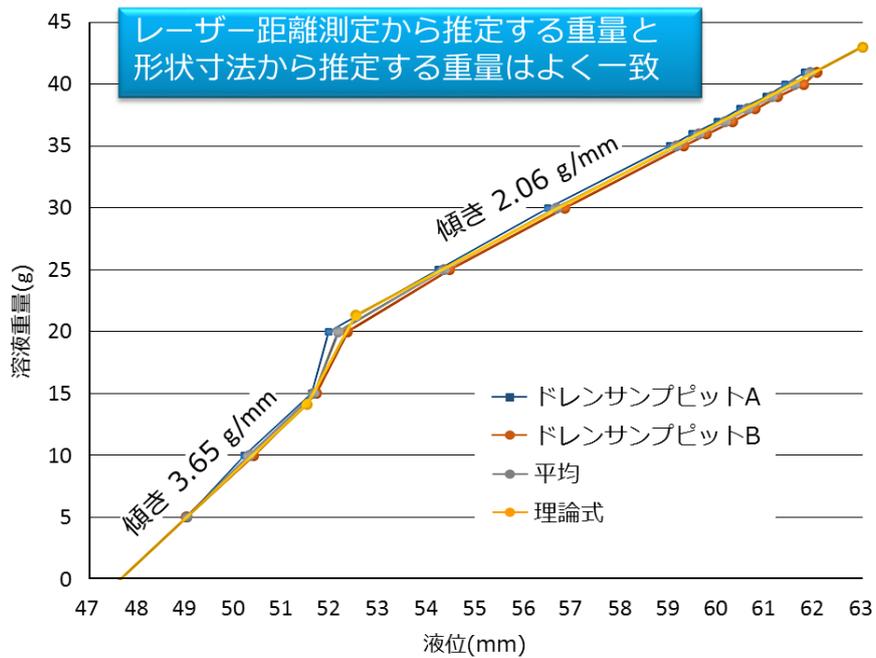
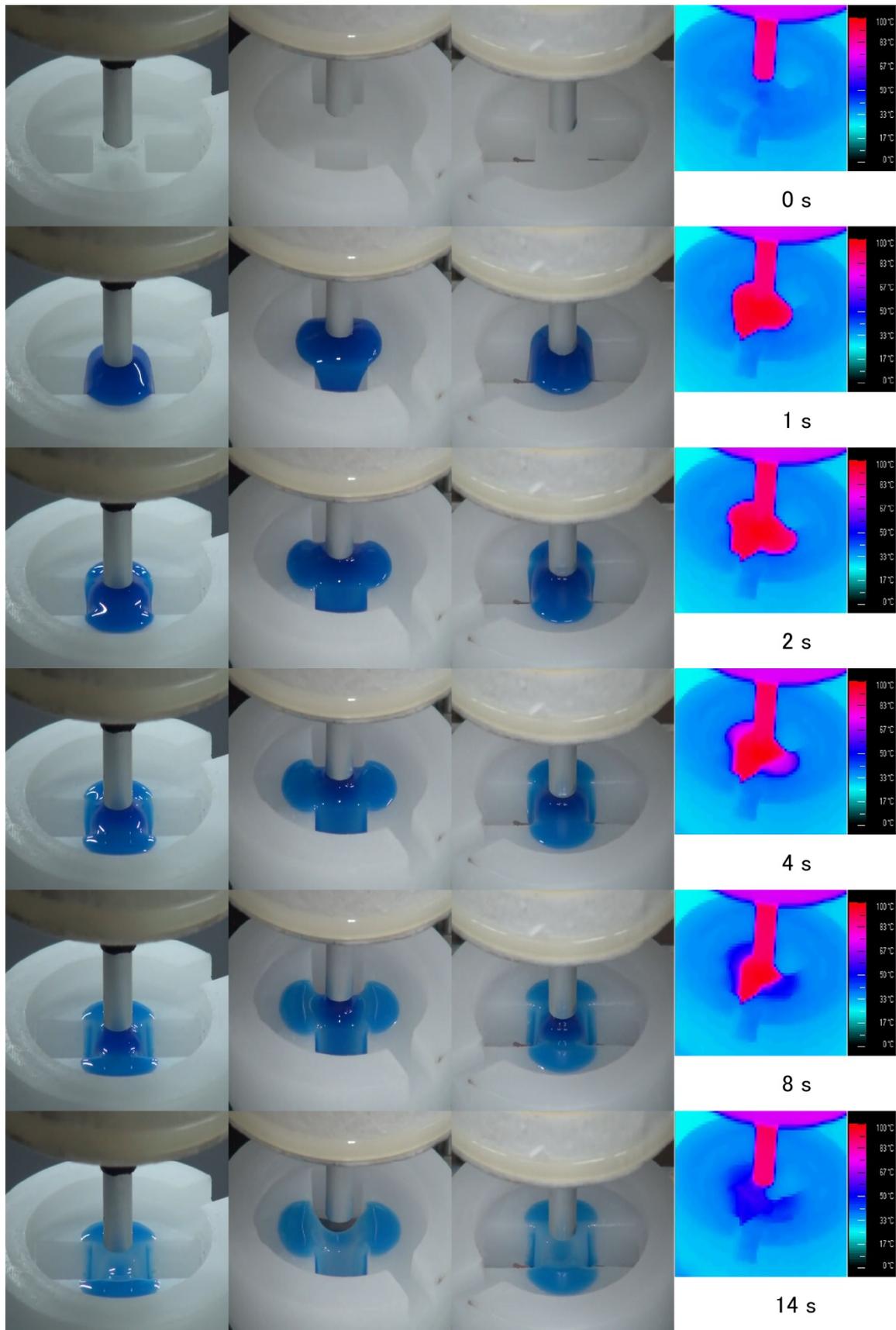
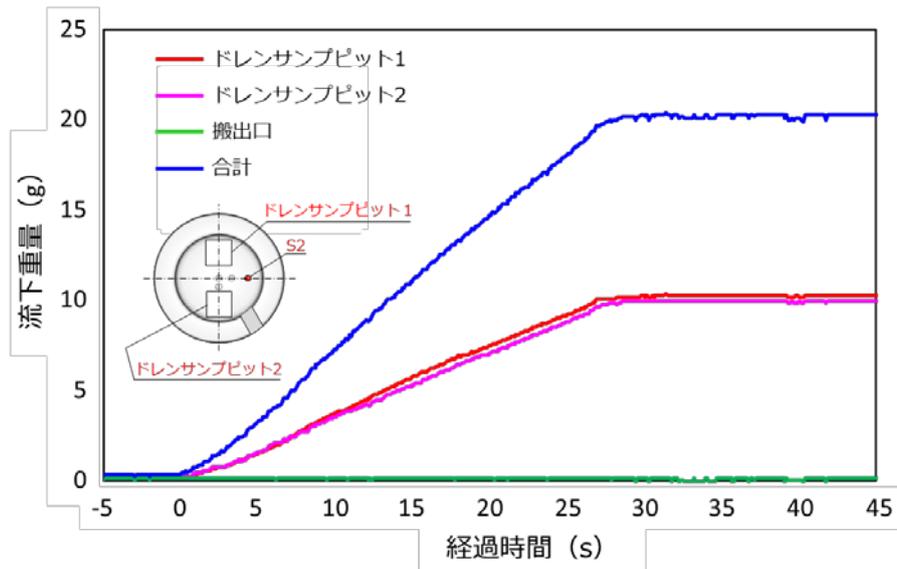


図 3.2-23 : レーザー測定結果と理論式から算出される結果の比較



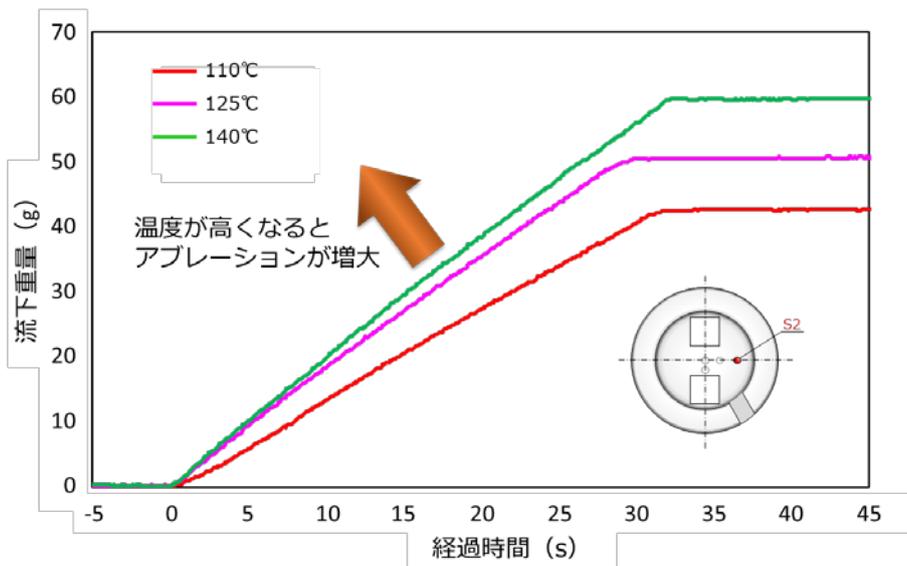
流下流量 40 g/min、初期温度 110°C、流下位置 C0

図 3.2-24 : アブレーションを伴う模擬デブリ流下実験の流動観察結果 (ケース名 : M5000V40T110C0)



粘性係数：5000 mm<sup>2</sup>/s ， 初期温度：110℃， 流下位置：S2， 流下流量：40 g/min

図 3.2-25：サンプルピット及び搬出口への流出量（流下重量の時間変化）



粘性係数：5000 mm<sup>2</sup>/s ， 落下位置：S2， 流下流量：80 g/min

図 3.2-26：溶融物温度の影響（流下重量の時間変化）

## (2) アブレーション形状測定結果

ペDESTALモデルの表面をレーザー変位計で分析し、2次元深さ分布を図 3.2-27 に示す6測線で取得した。例として実験ケース No.1（ケース名：M5000V40T110C0）の実験後のペDESTALモデル表面形状の測定結果を図 3.2-28 示す。ペDESTALモデルを溶液に沈めた場合の液位を計測した結果からは、シリコン油流下後のアブレーションの量によって液位が異なっており、実験ケースの中では流下流量 80 g/min、初期温度 140℃、流下位置 S2：南側 2 の場合が最もアブレーション

オン量が大きい結果となった(表 3.2-11 参照)。また、表面形状測定結果ではアブレーションはサンプルピットの角を丸めるように進行したことが分かり、流下位置が C0 : 中心、S1 : 南側 1、W1 : 西側の場合は流下位置を通過する測線(C0 : 測線 3、S1 : 測線 4、W1 : 測線 3) で流下後の表面形状にアブレーションを確認できた。流下位置が S2 : 南側 2 においては、流下位置 S2 近傍の測線 4、測線 5 及び S2 を通過する測線 6 で流下後の表面形状にアブレーションを確認できた。

流下位置 S2 にシリコン油が流下した後のペDESTAL 模型表面形状を初期温度で比較した。流下流量 20 g/min の場合、40 g/min の場合、80 g/min の場合共に初期温度が高くなるにつれアブレーション量が増大した。一方、流下位置 C0 にシリコン油を流下流量 40 g/min で流下した場合、初期温度 110°C でのアブレーション量 (1,273 mm<sup>3</sup>) が初期温度 140°C のアブレーション量 (655 mm<sup>3</sup>) より大きくなった。初期温度 140°C での測線 3 の表面形状ではドレンサンプルピット間の床面が大きくアブレーションしていたことから、流下したシリコン油が両側のドレンサンプルピットから流れ落ち、初期温度 110°C に比べ他の床面に拡がらなかったと考えられる。流動観察結果の図 3.2-29 (初期温度 110°C) と図 3.2-30 (初期温度 140°C) を比べると初期温度 140°C のシリコン油の床面への拡がりが小さいことが確認できる。

次に流下位置 S2 にシリコン油が流下した後のペDESTAL 模型表面形状を流下流量で比較した。初期温度 110°C での比較は図 3.2-31、初期温度 140°C での比較は図 3.2-32 である。初期温度 140°C の場合は流下流量が 20 g/min、40 g/min、80 g/min と多くなるとアブレーション量も大きくなっている。特に測線 3 の表面形状では流下流量が多くなるにつれドレンサンプルピット間の床面が大きくアブレーションしているのが確認できる。一方、初期温度 110°C の場合、逆に流下流量が 80 g/min、40 g/min、20 g/min と少なくなるにつれてアブレーション量が 20 mm<sup>3</sup>、94 mm<sup>3</sup>、437 mm<sup>3</sup> と大きくなっている。表面形状では、測線 2 のドレンサンプルピット間の床面で流下流量 40 g/min、20 g/min でのアブレーションが 80 g/min の形状に比べてわずかに増えているのが確認できるだけである。初期温度 110°C では、140°C に比べアブレーションが起き難いため流下流量を多くしてもアブレーションに影響を及ぼさずにペDESTAL 模型から流れ落ちる量が増えていると考えられる。一方、流下流量が少ない場合はゆっくりとアブレーションを起こしながら流れ落ちるため、アブレーション量が大きくなっていると考えられる。

また、流下流量 40 g/min のシリコン油が流下した後のペDESTAL 模型表面形状を流下位置で比較した。例として初期温度 140°C での比較を図 3.2-33 に示す。初期温度 140°C の場合は、流下位置 C0 より中心から離れた流下位置 S2 でアブレーション量が大きくなった。表面形状では測線 4 の形状が流下位置 C0 より S2 のアブレーション量が大きくなった。このような傾向と異なり、初期温度 110°C の場合は、流下位置 S2、S1、W1、C0 の順でアブレーション量が大きくなった。表面形状では測線 3 の形状が S2、S1、W1、C0 の中心に近い順でアブレーション量が大きくなった。初期温度 140°C の場合は、110°C に比べアブレーションに与える影響が大きいため、シリコン油が床面に拡がることでアブレーション量が大きくなっていると考えられる。一方、初期温度 110°C の場合、140°C に比べアブレーションが起き難いが、流下位置に集中して流れるとアブレーションが起き易く、床面に拡がると温度の影響がより小さくなりアブレーションが起き難くなっていると考えられる。

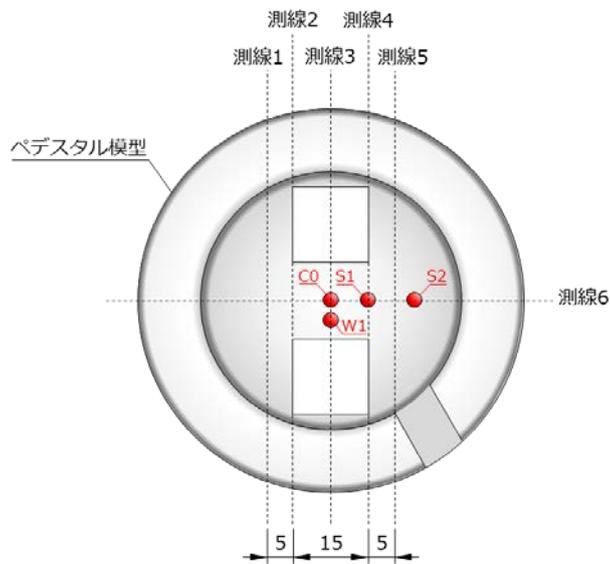
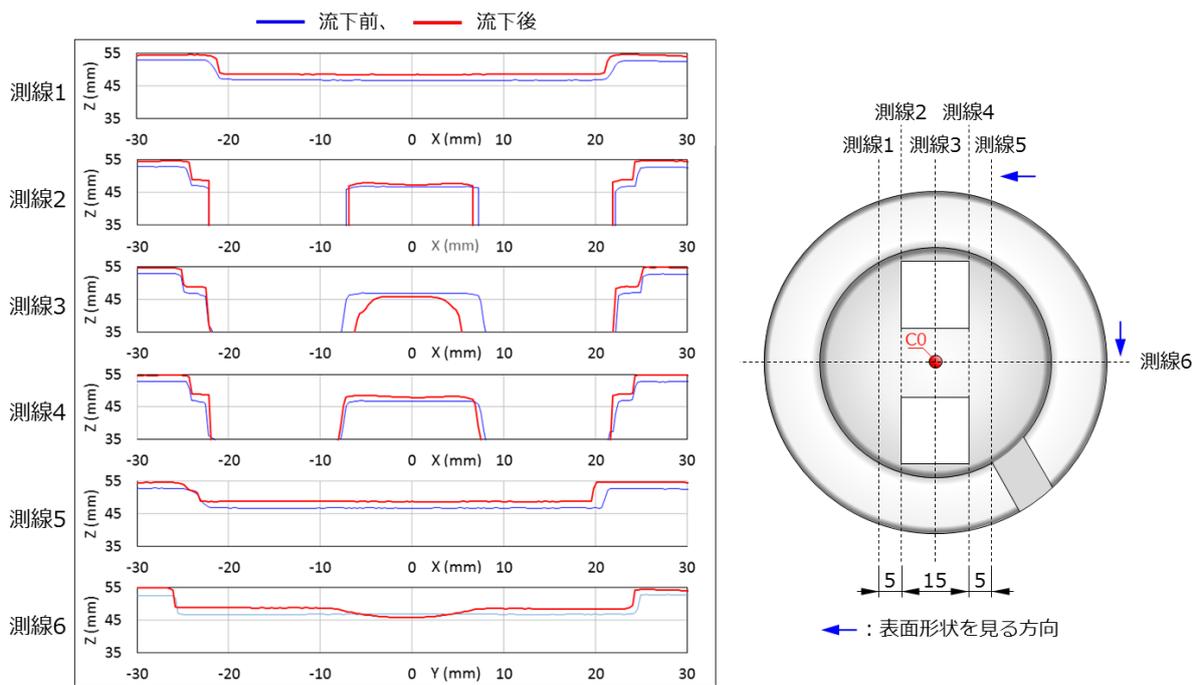
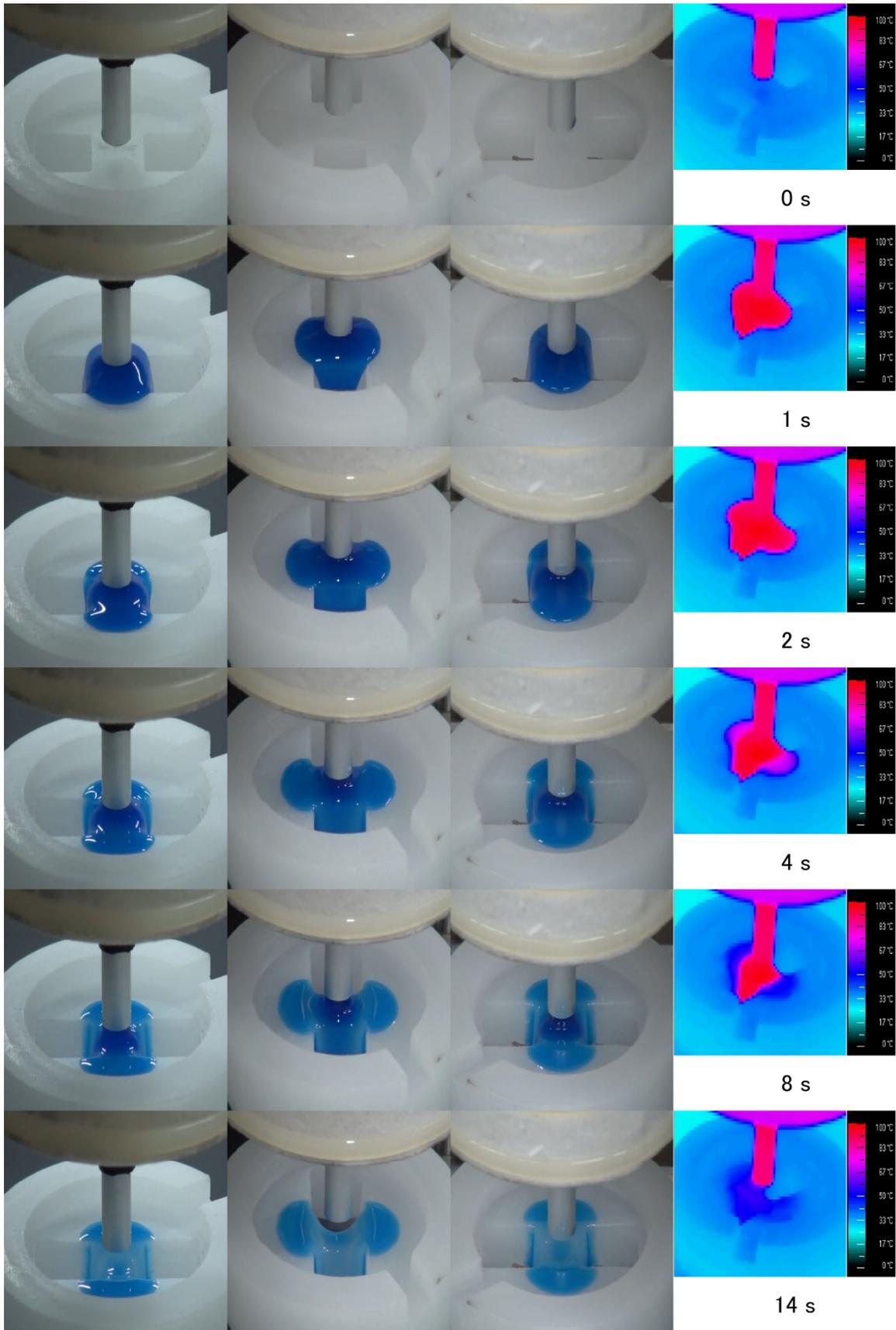


図 3.2-27 : アブレーション形状の測定 (2次元×6断面)



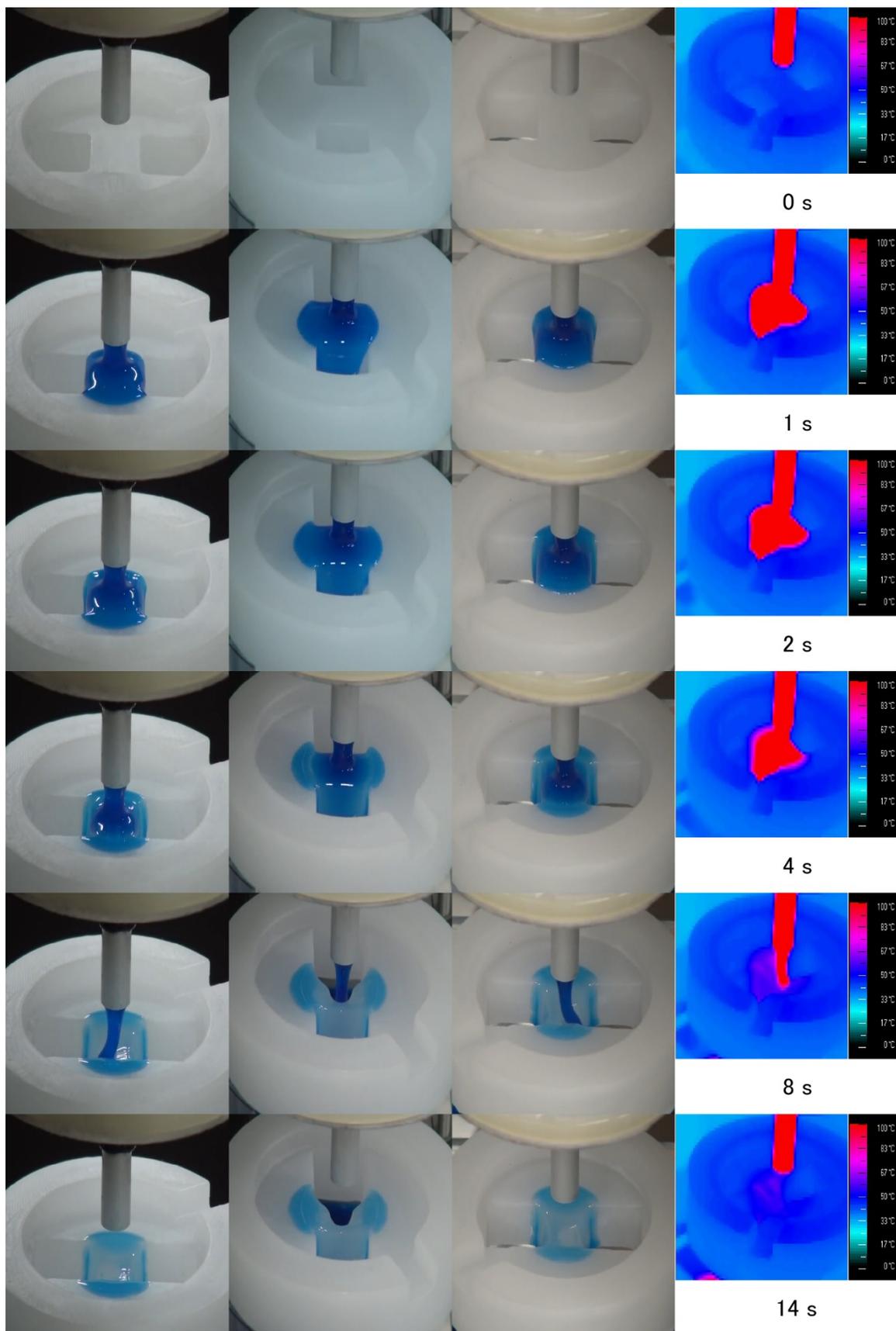
流下流量 40 g/min、初期温度 110°C、流下位置 C0

図 3.2-28 : 流下後のペDESTAL模型表面形状 (ケース名 : M5000V40T110C0)



流下流量 40 g/min、初期温度 110°C、流下位置 C0

図 3.2-29：流動観察結果（ケース No. 1：M5000V40T110C0）



(流下流量 40 g/min、初期温度 140°C、流下位置 C0)

図 3.2-30 : 流動観察結果 (ケース No. 6 : M5000V40T140C0)

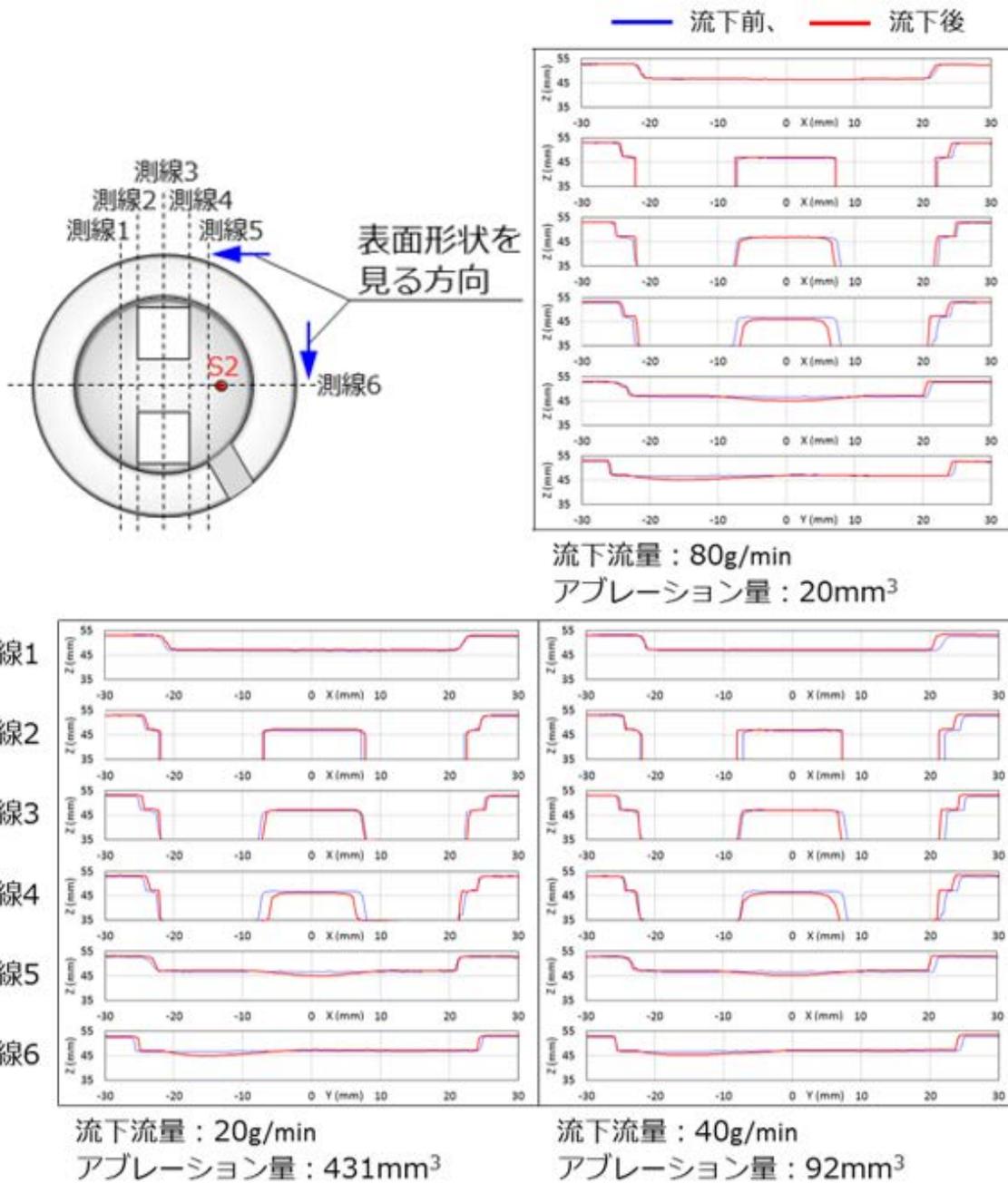


図 3.2-31 : ペDESTAL模型表面形状の流下流量による比較 (初期温度 110°C, 流下位置 S2)

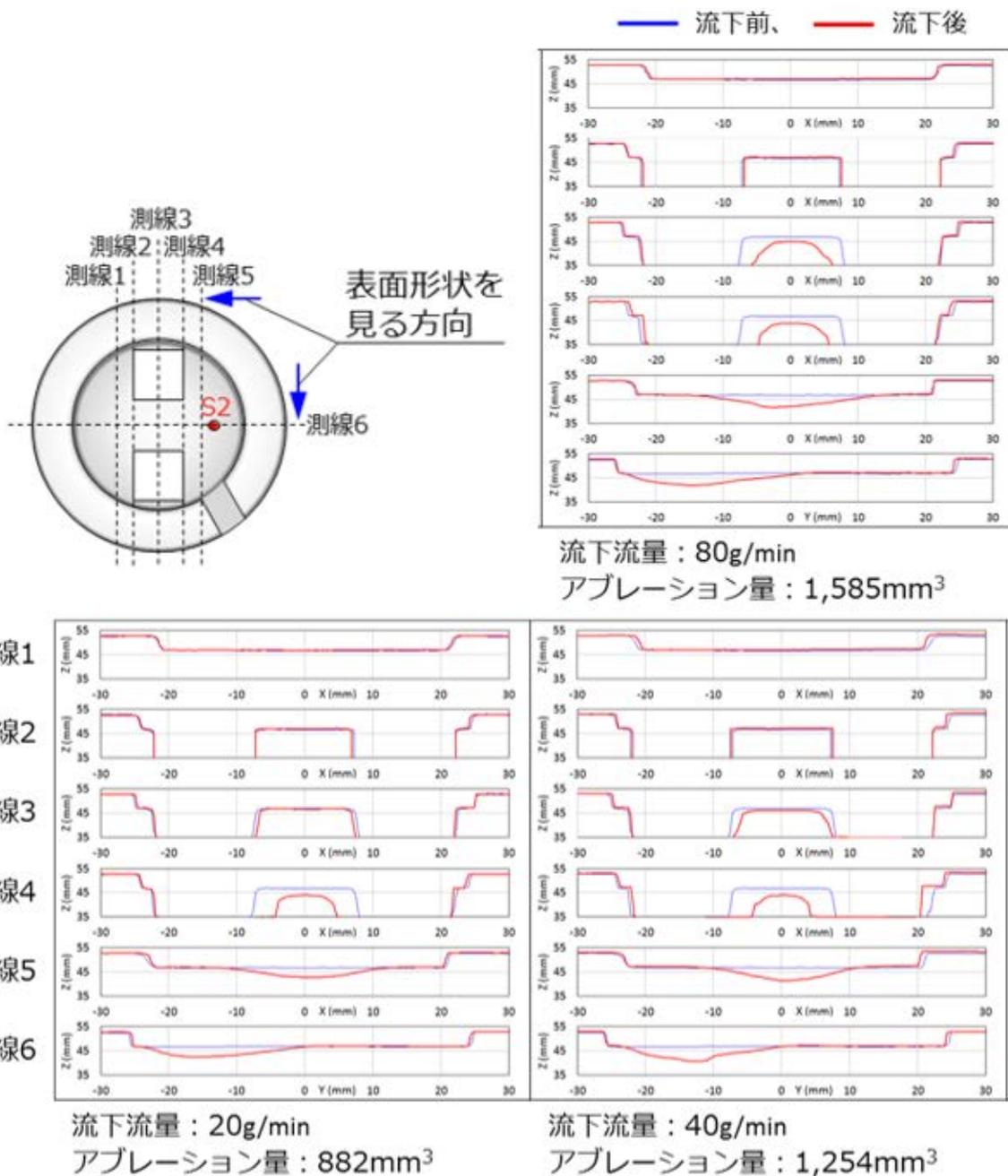
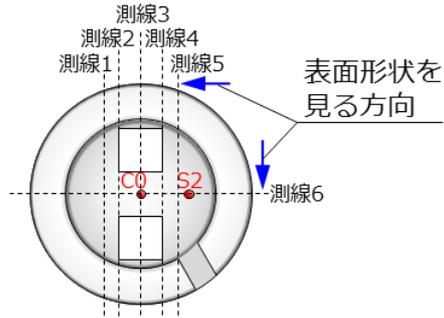
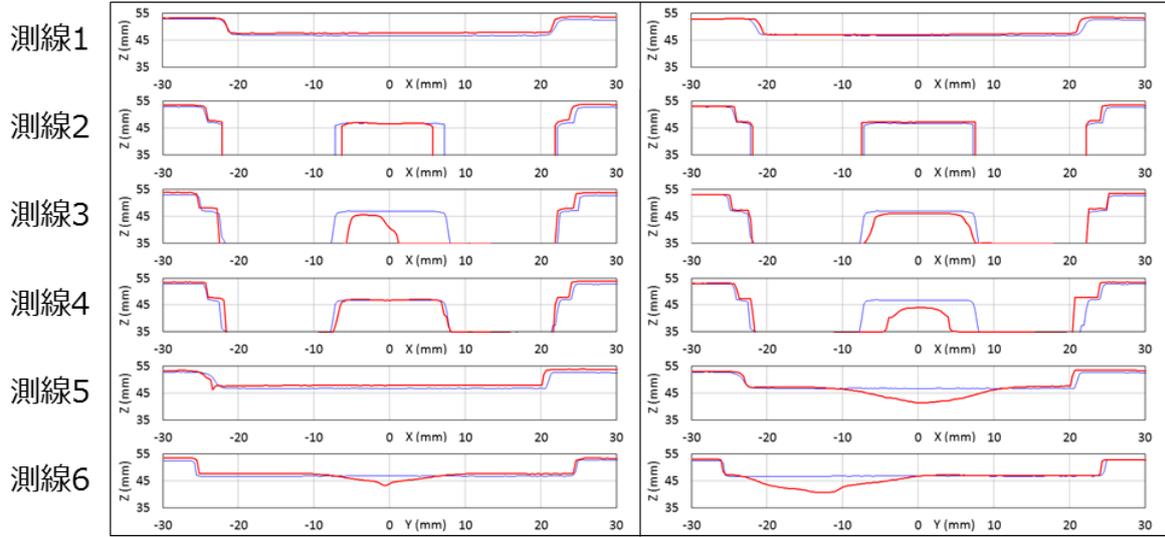


図 3.2-32 : ペDESTAL模型表面形状の流下流量による比較 (初期温度 110°C, 流下位置 S2)



— 流下前、 — 流下後



流下位置 : C0  
アブレーション量 : 645mm<sup>3</sup>

流下位置 : S2  
アブレーション量 : 1,254mm<sup>3</sup>

図 3.2-33 : ペDESTAL模型表面形状の流下位置による比較 (流下流量 40 g/min, 初期温度 140°C)

#### 3.2.4. まとめ

MPS 法による解析の妥当性を確認するために、模擬デブリ（シリコン油）が床面に衝突して堆積し、流出する現象を定量的に示す模擬デブリの三次元流動可視化・計測実験の体系を構築した。床面構造として BWR Mark-I 型格納容器ペデスタルを縮小した三次元 CAD 図を作成し、三次元造形した。更に、光学カメラ（三方向）、二次元レーザー変位計、微小重量計を設置し、熔融物の界面形状を可視化し、熔融物の流出量を時間の関数として定量化できる実験体系を構築した。

構築した体系を用いて先ず、熔融物による床構造のアブレーションを伴わない等温条件で実験（等温実験）を実施した。早稲田大学と連携し、模擬デブリの流下位置、量、粘性（50, 200, 1000, 5000 mm<sup>2</sup>/s）等の実験パラメータを定め、デブリの三次元流下挙動の可視化データを取得した。異なるスケールで実験し、スケール効果も分析した。いずれのケースでもシリコン油流下部の延長線上は液膜が薄く、横方向外縁では慣性力を失って水力跳躍により盛り上がった。このような光学観察と重量物時系列データが得られたことから、作製した装置及び実験体系が MPS 法解析の妥当性確認に必要なデータを与えることができることを確認した。

次に同様な条件で床材に融点の低い材料を用い、模擬デブリによる床のアブレーションを伴う流下挙動を可視化し、MPS 法の解析結果の検証データを取得した。模擬デブリの流下位置（4箇所）と流量（3水準）は等温実験と同じ条件を基準にした。これらの条件で、模擬ペデスタル床に有意なアブレーションが生じるように模擬デブリの初期温度（3水準）を定めた。光学カメラとサーモグラフィーを用いて流下挙動を温度分布と共に可視化し、サンプルピット部及び搬出口からの流出量を、重量計を用いて時系列計測し、MPS 法の解析の妥当性確認に適したデータを取得した。さらに、アブレーション量の分析を行い、形状寸法から推定したアブレーション体積とレーザーで計測したアブレーション形状の比較を行った。アブレーション量の分析結果を比較することで初期温度、流下流量、流下位置によるアブレーションの特性を確認することができた。

### 3.3. UO<sub>2</sub> 流下実験による基礎データ取得（再委託先：大阪大学）

#### 3.3.1. 平成 28 年度の実施内容及び成果

##### 3.3.1.1. 実験体系の概要

実験体系の概要を図 3.3-1 に示す。コンカルノズル下部からガスを流すことにより、試料はコンカルノズル上に浮遊する。浮遊した試料に上部から 100 W の CO<sub>2</sub> レーザー（波長 10.6 μm）を照射し、加熱溶融させる。試料の温度は放射温度計 (IR-CAS8CNL, CHINO) により測定する。試料の様子は、モノクロ CMOS カメラ (HAS-D72M, DITECT) により観察する。このカメラは 1280 × 1024 ドットで最速 2000 コマ/秒の撮影が可能であるため、衝突の様子を記録するのに適している。バックライトには紫外光ランプ (L9588-02A, 浜松ホトニクス) と波長 370 ± 5 nm のバンドパスフィルターを用いている。これは、高温の物体から放射される電磁波（光）の影響を排除するためである。高温の物体は発光するが、発光は物体の輪郭が不明瞭になる原因となる。物体から放射される電磁波の分光放射輝度はプランクの法則に従い、高温になるほど短波長の電磁波の強度が大きくなる。しかし、370 nm であれば UO<sub>2</sub> の融点付近でも放射の影響を抑えて観察が可能であると考えられる。

試料の衝突実験には、①ハンマーと、②分割式コンカルノズルを用いる。①のハンマーは、試料の横からハンマーを衝突させ、そのときの液滴試料の挙動を観察する。この実験方法は、装置構成が極めて単純であるという特徴がある。②の分割式コンカルノズルでは、ノズルを分割することで液滴試料を落下させ、あらかじめ設置した基板に衝突させてその様子を観察する。

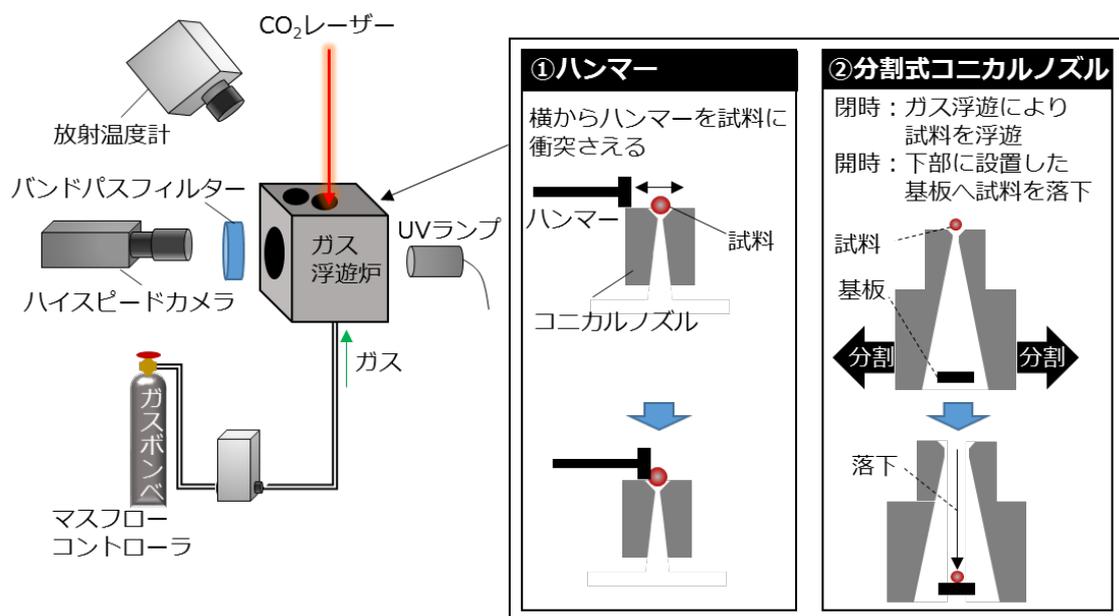


図 3.3-1：液滴衝突実験装置の概要

##### 3.3.1.2. 作製した装置

図 3.3-2(a) に、分割式コンカルノズルの写真を示す。ノズルは分割してあり、図中に赤棒で示したように、ノズルの開閉はガスアクチュエーターによって制御している。ここでは、ノズル下部に白色のアルミナ板を衝突用の基板として設置している。図 3.3-2 (b)、図 3.3-2 (c) は、バルク状のアルミナ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 純度 99.6%) を粉砕することで得た試料片を溶融させたときの様子を

観察したものである。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の融点は2,000 °C以上であるが、溶融して球状になった試料の輪郭が明瞭に記録できていることが分かる。本装置では直径2 mm程度のサイズの試料が浮遊溶融可能であることが確認できた。

試料の温度は放射温度計によって測定する。放射温度計による温度計測のためには対象物の放射率が必要だが、一般的に溶融物の放射率は知られていない。そこで、ここでは試料の融点 $T_L$ と測定した試料の融点 $T_L^{Pyro}$ を元に、Wien' s law を用いて測定温度 $T^{Pyro}$ を校正して温度 $T$ を導出した。Wien' s law によると、 $T_L$ ,  $T_L^{Pyro}$ ,  $T^{Pyro}$ ,  $T$ には以下のような関係が成り立つ。

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T^{Pyro}} = -\frac{1}{T_L^{Pyro}} + \frac{1}{T_L} \quad (3.68)$$

図 3.3-3 に、放射温度計で測定した Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 試料の温度を、(3.68)式を用いて校正した値を時間に対してプロットした図を示す。1.5s 付近で加熱レーザーをオフにしている。レーザーをオフにした後で試料温度は低下し、3s 付近で一旦温度が上昇してから温度が一定になっていることが分かる。これは試料が凝固したことを意味しており、この温度が Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の融点、 $T_L = 2,055$  °C に相当する。以上により、放射温度計を用いた試料温度の測定が可能であることが示された。

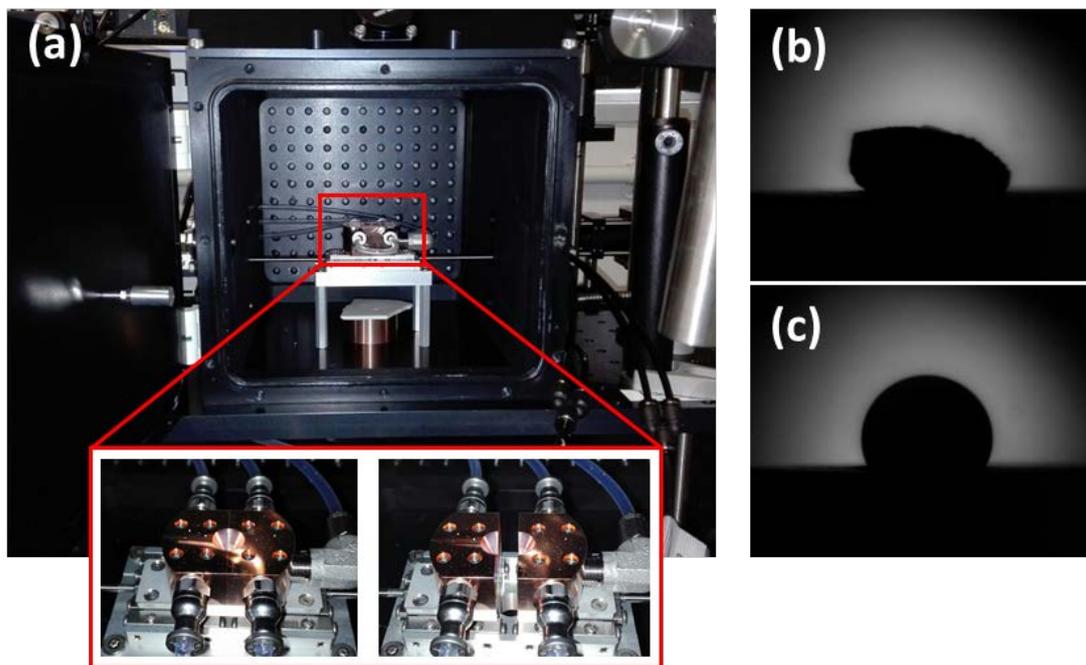


図 3.3-2 : 作製した液滴衝突実験装置と試料溶融時の観察例

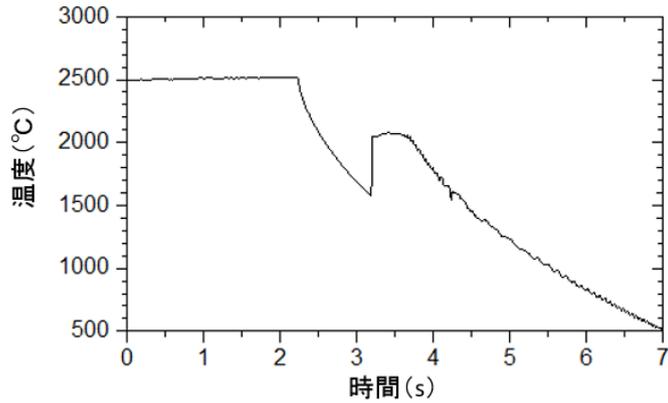


図 3.3-3：放射温度計によって測定した試料温度

### 3.3.1.3. 衝突実験結果

作製した実験装置を用いて  $\text{Al}_2\text{O}_3$  の液滴衝突実験を行った結果を図 3.3-4 に示す。用いたアルミナは純度 99.6% であり、①のハンマーには反応性が低い窒化ホウ素 (BN) を用いた。また、②の分割式コニカルノズルでは  $\text{Al}_2\text{O}_3$  を衝突用の基板として用いた。試料サイズはいずれも直径約 2 mm である。

ハンマーを用いた衝突実験では右からハンマーを衝突させたが、試料形状はほとんど変化せずに液滴が移動したのみであった。一方、分割式コニカルノズルを用いた実験では液滴が固体基板に衝突して変形していく様子が記録できた。ハンマーを用いた衝突実験で試料形状が変化しなかったのは、ハンマーを衝突させる速度が遅かったことが原因であると考えられる。分割式コニカルノズルを用いた実験では 3 ms 程で液滴の形状が完全に変形しているが、ハンマーは 1mm 動くのに 30 ms 程度の時間がかかっており、衝突速度が一桁異なっている。本実験では手動でハンマーを動かしたが、ハンマーでの衝突実験により液滴の形状変化を観察するためにはハンマーの駆動方式を検討する必要があることが明らかになった。

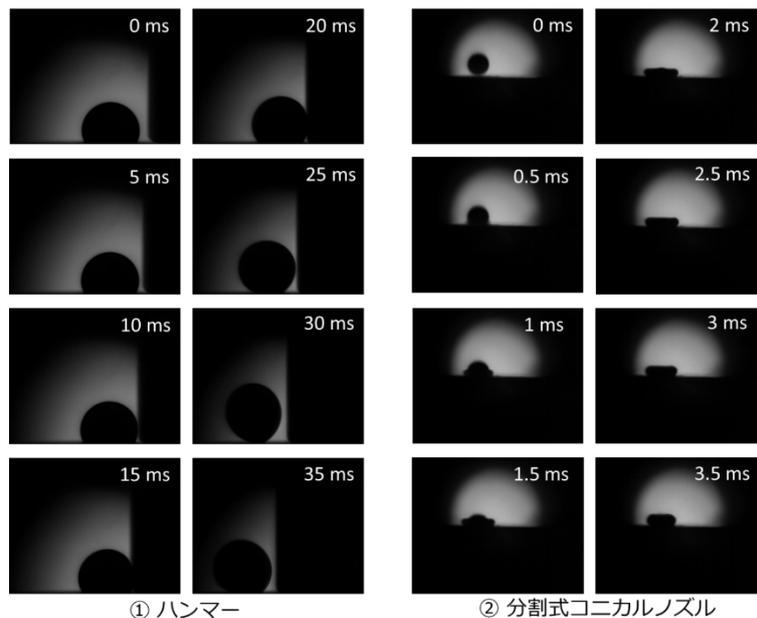


図 3.3-4：①ハンマー及び②分割式コニカルノズルを用いて行った  $\text{Al}_2\text{O}_3$  液滴衝突実験の様子

### 3.3.2. 平成 29 年度の実施内容及び成果

#### 3.3.2.1. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> 試料作製方法

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (純度 99.99%, 高純度化学) と ZrO<sub>2</sub> (純度 99.99%, フルウチ化学) の粉末を表 3.3-1 に示すような組成で秤量し、不純物の混入を防ぐために ZrO<sub>2</sub> 製のボール及び容器を用い、200 rpm、60 min、アセトン中でボールミルによって混合した。得られた混合粉末を 150 MPa でコールドプレスし、φ15mm のペレットを作製した。ペレットを大気中で焼結 (昇・降温 100 K/h、1873 K で 24 時間保持) して緻密な焼結体を得た。焼結体の組成をエネルギー分散型 X 線分析 (Energy Dispersive X-ray spectrometry) によって分析し、表 3.3-1 に示すように仕込み組成とほぼ同じ組成であることを確認した。

この焼結体を粉砕し、小片を取り出してガス浮遊溶融装置によって溶融させた結果を図 3.3-5 に示す。試料は表面張力によって丸くなり、ガス浮遊実験に適した球状になった。以上により、本手法によって組成を制御したガス浮遊実験用の試料を作製可能であることが確かめられた。

表 3.3-1 : 試料の仕込み組成と組成分析結果

サンプル番号	仕込み組成		EDS 分析	
	wt. %		wt. %	
	ZrO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
①	40.0	60.0	41.28	58.72
②	20.1	79.9	23.56	76.44



図 3.3-5 : ガス浮遊溶融装置によって溶融させた Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> 試料の外観

### 3.3.2.2. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> 液滴衝突実験

平成 28 年度に作製した、分割式コンカルノズル装置を用いて実験を行った。実験には 3.3.2.1 項で作製した Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> 試料及び純 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 試料を用い、試料の組成や温度を変化させた実験が可能であることを確かめた。

#### (1) 液滴衝突実験の実験体系

平成 28 年度の検討結果を踏まえ、分割式コンカルノズルを採用した実験体系の概要を図 3.3-6 に示す。コンカルノズル下部からガスを流すことにより、試料はコンカルノズル上に浮遊した。このコンカルノズルはバネによって二つに分かれるようになっており、ガス圧によって押しえつけることで一体となっている。浮遊した試料は、平成 28 年度と同様な方法（第 3.3.1.1 参照）で加熱溶解・温度計測し、観察した。その後、ガス圧を開放し、バネによってノズルは二つに分かれ、試料は落下して基板と衝突し、その様子を観察した。基板には Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 板を用いた。測定後に大きさが既知の SUS 球（直径 2 mm）を撮影し、その大きさとの比較により長さを算出した。又、液滴が基板に衝突する際の速度も計算した。

本研究では試料浮遊時の温度をパイロメーターで測定し、レーザーをオフにした際の冷却曲線から浮遊時における試料温度を導出した。ノズルを開放した時点の試料温度と、試料が落下して基板に衝突するまでの時間、及びあらかじめ測定した冷却曲線から、試料が基板に衝突した際の温度を推定した。

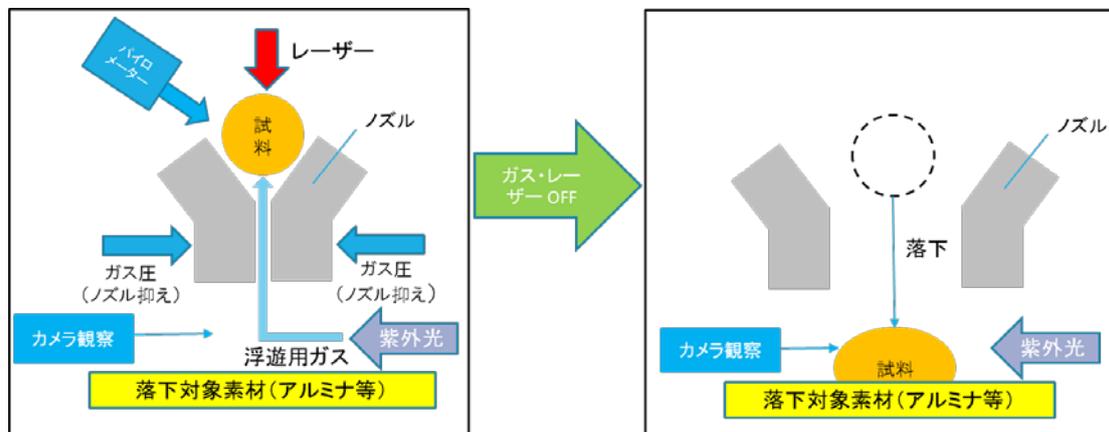
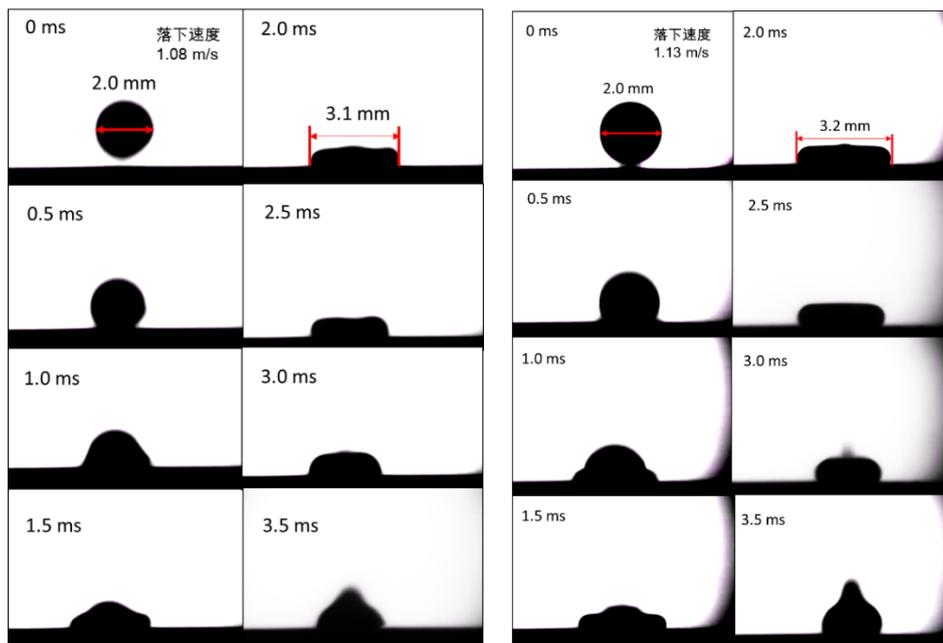


図 3.3-6：液滴衝突実験装置の概要（分割式コンカルノズル）

#### (2) 液滴衝突実験の結果

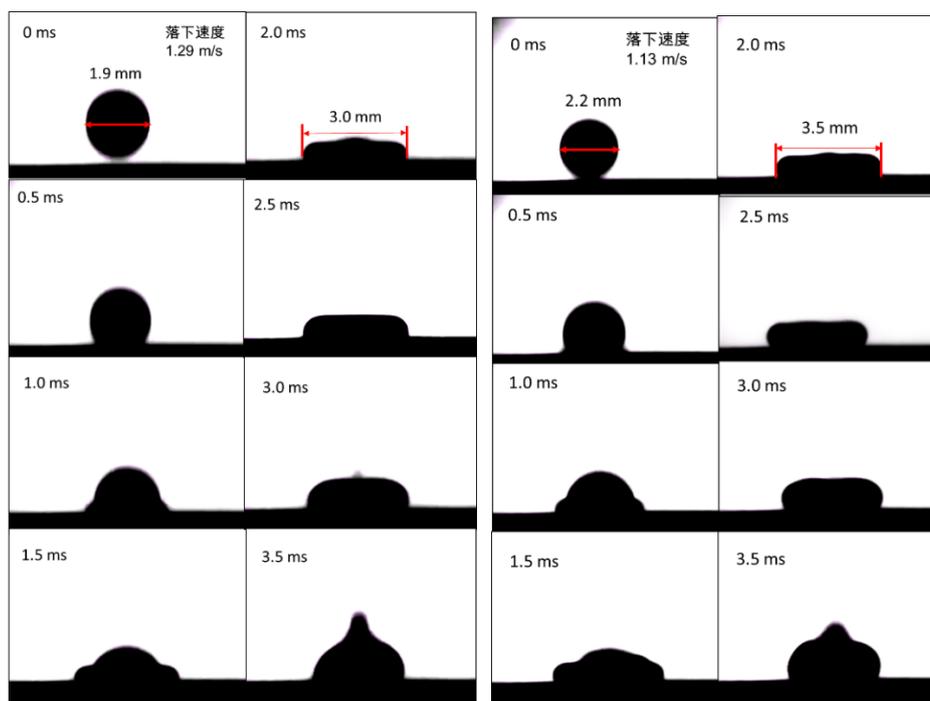
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 及び Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> 混合物の液滴衝突実験を行った結果を図 3.3-7 及び図 3.3-8 に示す。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> については衝突時の温度を変化させ、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> 混合物については組成を変化させた 2 通りの実験結果を示している。試料が基板と衝突して変形していく様子が明瞭に観察できていることが分かる。又、全ての実験において試料は基板と衝突した後に跳ね返った。このことから、試料は基板と濡れなかったと考えられる。



Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (at 2,811 K)

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (at 3,091 K)

図 3.3-7 : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 液滴衝突実験の様子 (温度は衝突時の推定温度)



サンプル ①

サンプル ②

(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 60 wt%- ZrO<sub>2</sub> (at 3,058 K))

(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 80 wt%- ZrO<sub>2</sub> (at 3,021 K))

図 3.3-8 : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> 液滴衝突実験の様子 (温度は衝突時の推定温度)

### 3.3.2.3. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粘性評価実験

高温融体（特に酸化物）の物性評価は極めて困難であるが、2013年にドイツ航空宇宙センター（DLR）のグループによってガス浮遊法（ADL: Aerodynamic Levitation）を用いて粘性を測定する技術が報告された [50]。この手法では、ガス浮遊させた試料をレーザーによって加熱溶解させ、音波を利用して液滴振動を励起する。この液滴振動の減衰挙動から粘性を評価するという技術であり、DLRのグループはこの手法を用いて Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の粘性測定に成功している。本研究では DLR のグループが開発した本手法に着目し、装置を作製して Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 融体の粘性を測定し、粘性測定技術を確立した。

#### (1) 粘性評価実験の実験体系

実験体系の概要を図 3.3-9 に示す。構成する光学部品は第 3.3.2.2 で示した落下実験装置と同じものを用いた。物性測定においては試料内温度に勾配があると影響が出るため、CO<sub>2</sub> レーザーを上下から照射して試料温度が一定となるようにした。又、粘性の測定に必要な正弦波音波振動はファンクションジェネレーター（AWG1005, AS ONE）によって生成し、アンプ（A-10, Pioneer）により増幅した正弦波信号をスピーカー（P830970, Tymphany）により音波に変換して浮遊中の試料に与えた。試料の温度測定は放射温度計により第 3.3.2.2 で示した手法を用いて行った。

図 3.3-10(a) に作製した装置の外観写真を示す。紫外光をバックライトとして用い、図 3.3-10(b) に示すような投影画像を得た。この際、試料の一部がノズルによって隠れてしまった。そこで、図 3.3-10(c) のように試料の輪郭を楕円でフィッティングすることにより試料全体の形状を推定した。この際得られる試料の長径  $a$  並びに短径  $b$  は画素数 (Pixel) で得られるため、大きさが既知であるテンレス製ベアリング球（直径 2.0, 2.5, 3.0 mm）を観察し、画素数と長さの関係式を得たうえで試料径を算出した。図 3.3-11 に画素数と長さの関係を示す。この画像解析結果から浮遊試料の体積  $V$  は

$$V = \frac{4}{3}\pi a^2 b \quad (3.69)$$

で表され、測定後の試料質量  $m$  を測ることにより試料密度  $\rho$  は

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.70)$$

によって算出することができる。

粘性の測定は、浮遊試料に音波振動を印加し、それを停止した後の減衰振動の様子を観察することで行った（液滴振動法）。正弦波音波振動の振動数が試料の固有振動数と一致していると、試料は音波との共振振動により図 3.3-12 のような変形を繰り返す。音波の印加を停止すると、試料の振動は粘性によって減衰していく。振動は指数関数的に減衰していくため、試料径は次のような式で表される。

$$r(t) = A \exp(-\Gamma(t - t_1)) \times \sin(2\pi\nu_R(t - t_0)) + R_{av} \quad (3.71)$$

ここで、 $\Gamma$  は減衰振動係数、 $A$  は初期の振幅、 $t$  は時間、 $t_0$  はオフセット、 $t_1$  は減衰が開始した時間、 $\nu_R$  は共振周波数、 $R_{av}$  は振動していないときの液滴の半径を表す。図 3.3-13 に、水平方向の

試料径とそれを (3.71) 式によってフィッティングした結果を示す。振動の減衰挙動が (3.71) 式でフィッティングできていることが分かる。

粘性  $\eta$  は減衰係数  $\Gamma$  を用いて次の式で計算することができる。

$$\eta = \frac{1}{5} \rho R^2 \Gamma \quad (3.72)$$

この式での  $R$  は試料が真球であるとみなした時の試料径であり、密度を用いて次式により算出した。

$$R = \left( \frac{3m}{4\rho\pi} \right)^{1/3} \quad (3.73)$$

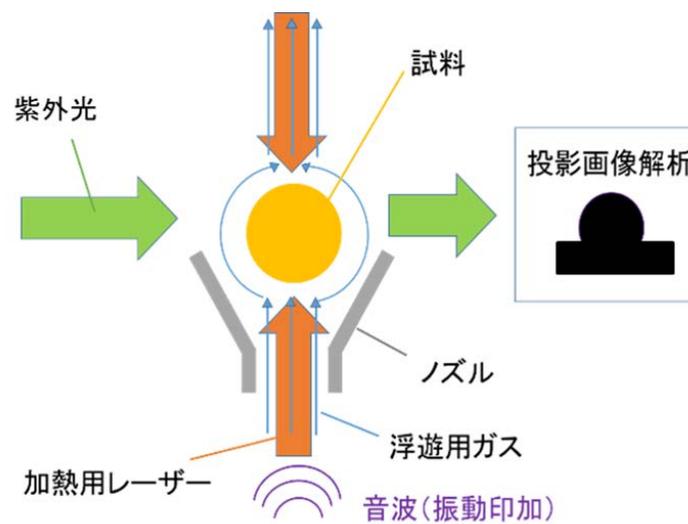


図 3.3-9 : 物性測定装置の概要

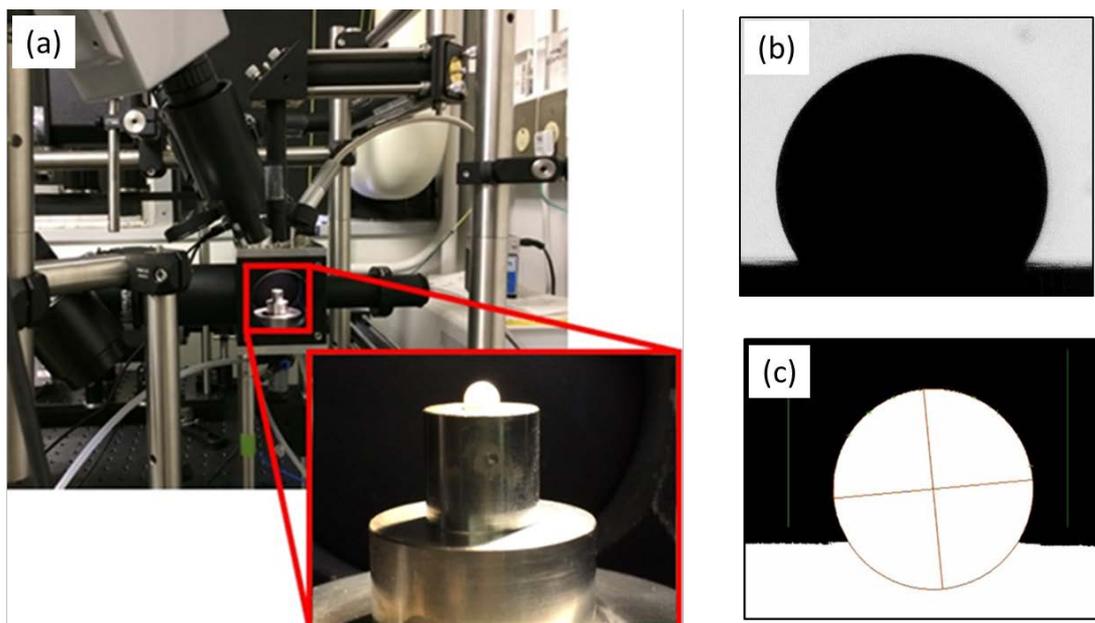


図 3.3-10 : 物性測定用装置

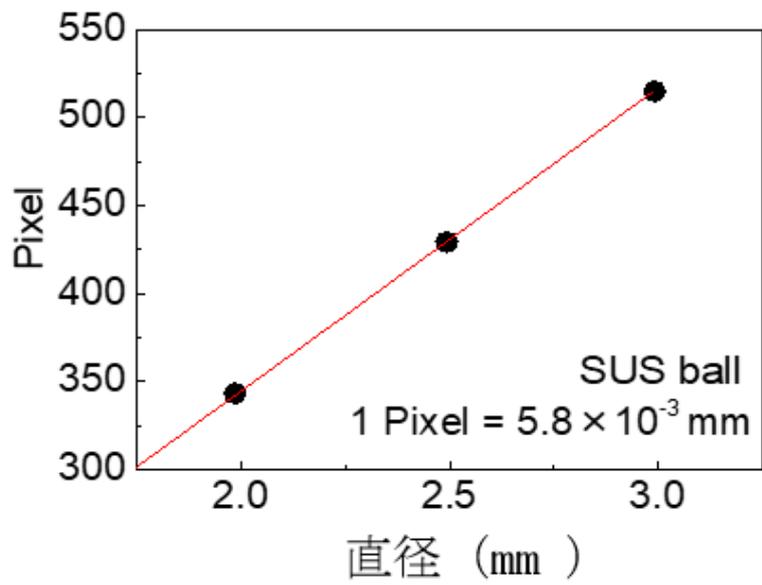


図 3.3-11 : 画素数と長さの関係

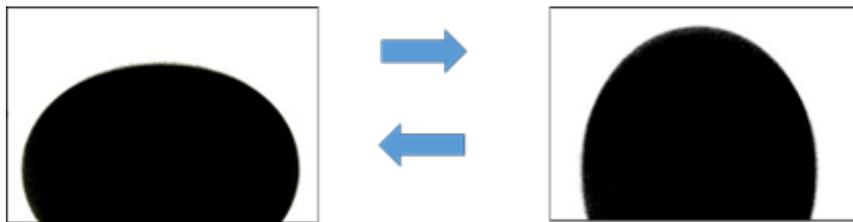


図 3.3-12 : 振動中の試料 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

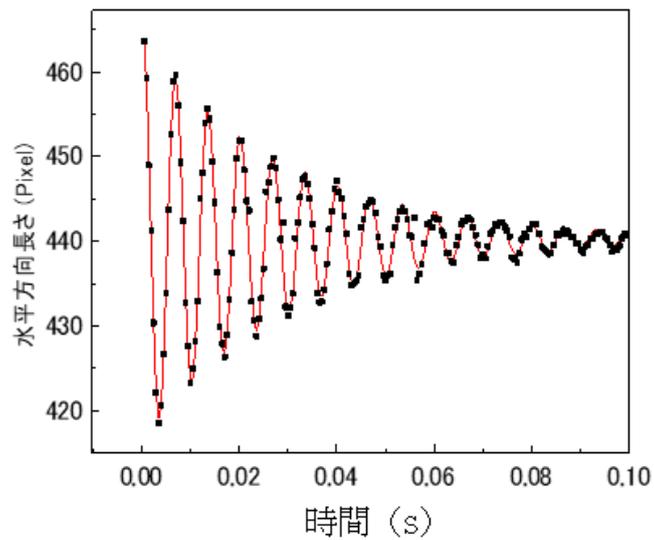


図 3.3-13 : 水平方向の試料径の時間変化とフィッティング結果 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

## (2) 粘性評価実験の実験結果

図 3.3-14 に、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  の密度の測定結果を文献値 [50] と共に示す。測定値は文献値と良く一致していることが分かる。多くの液体の密度は、温度に対して線形に変化することが知られている。そこで、得られた測定値を直線でフィッティングした結果を図 3.3-14 に示す。測定結果は、直線で良く近似できていることが分かる。測定データのばらつきは最大で 3.3% であり、文献値とのずれは最大で 1.2% であった。以上より、本実験装置によって高い精度で密度の測定が可能であることが示された。

図 3.3-15 に、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  の粘性の測定結果を文献値 [50] と共に示す。こちらも文献値と良く一致していることが分かる。文献値とのずれは、最大で 14% であった。測定は各温度で 3 回行い、その標準誤差を不確かさとみなしてエラーバーとして図 3.3-15 に示している。標準誤差は最大で 7.6% であった。以上より、粘性についても本実験装置によって測定が可能であることが示された。

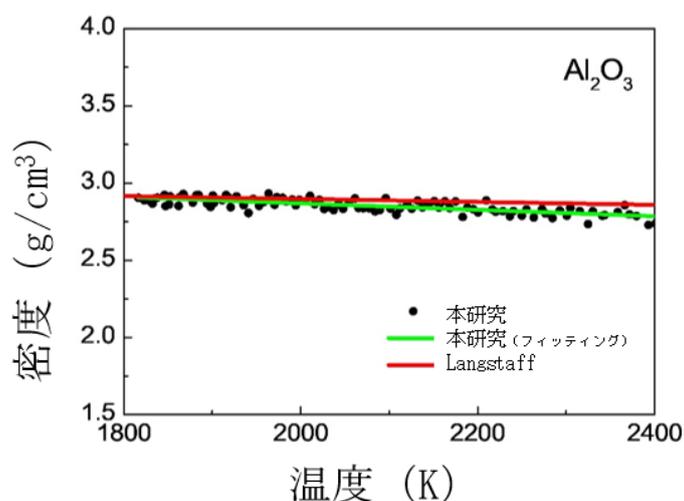


図 3.3-14 :  $\text{Al}_2\text{O}_3$  融体の密度測定結果

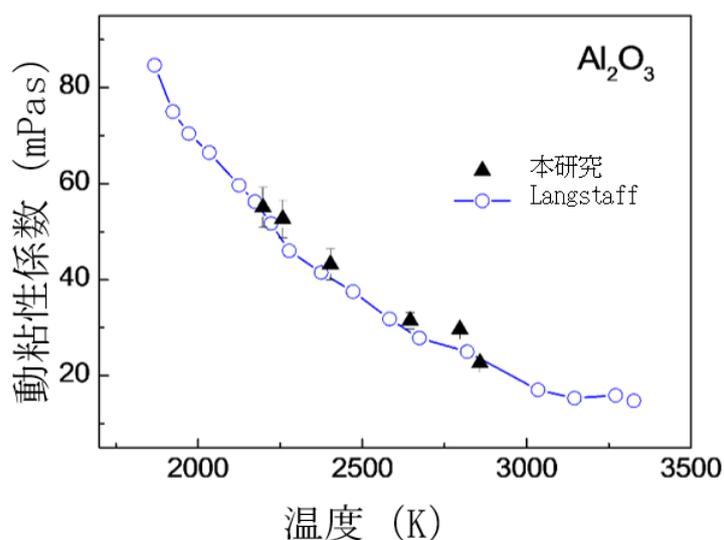


図 3.3-15 :  $\text{Al}_2\text{O}_3$  融体の粘性測定結果

### 3.3.2.4. 液滴衝突法を利用した表面張力評価実験

浮遊法を用いた酸化物溶融物の表面張力測定方法は、現在のところガス浮遊法を用いた液滴振動法のみが報告されている。この手法はDLRのグループによって提案されたものであり、 $Al_2O_3$ の表面張力が測定されている [50]。しかし、この手法は測定に長時間必要であるため、より高温の $ZrO_2$ や $UO_2$ の測定時には試料の蒸発の影響のために適用が難しいと考えられる。そこで、 $ZrO_2$ や $UO_2$ の表面張力測定のために、酸化物溶融物の表面張力を短時間で測定できる新しい方法（液滴衝突法）を考案した。本手法では、本研究で実施した液滴衝突実験の結果を解析し、落下した際の試料の変形挙動から表面張力を算出した。

#### (1) 表面張力評価実験の実験体系

液滴が基板に衝突する直前と、液滴が基板に衝突して変形し、静止した時点でエネルギー保存則を考える。液滴が基板に衝突する直前には、液滴は運動エネルギー $E_m$ を有している。一方、液滴が基板に衝突して変形し、静止した時点では運動エネルギーは0であるが、変形によって増加した面積分のエネルギーが増加している。この増分を $E_s$ とする。又、液滴が変形する際に粘性によってエネルギーが散逸する。そのエネルギーを $E_v$ とする。このとき、エネルギー保存則により以下の関係が成り立つ。

$$E_m = E_s + E_v \quad (3.74)$$

ここで $E_m$ は、液滴の衝突直前の速度を画像解析によって得ることで計算できる。 $E_v$ は、液滴が衝突して変形する様子を液滴の振動の一部（1/4周期の振動）とみなすことで導出する。減衰振動における1周期当たりのエネルギー減少率は、減衰比 $\zeta$ を用いて $4\pi\zeta$ と表せる。そのため、 $E_v$ は下記のように表せる。

$$E_v = E_m\pi\zeta \quad (3.75)$$

減衰比は減衰振動係数 $\Gamma$ と以下のような関係式が成り立つ。

$$\Gamma T = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (3.76)$$

ここで、 $T$ は減衰振動の一周期間の時間である。

$E_s$ は、表面張力 $\gamma$ と液滴の衝突前後の表面積の変化から以下の式で表すことができる。

$$E_s = \gamma(S_d - S_s) \quad (3.77)$$

ここで、 $S_s$ は変形前の液滴の表面積、 $S_d$ は変形後の液滴の表面積である。変形前の液滴の表面積は、液滴が球であるとみなして衝突前の液滴の画像から計算した。変形後の液滴は上下が2つの円板で、側面は曲面で表せる回転対称な形状であるとみなすと、断面の輪郭は図 3.3-16 のようになる。曲面についてはパップス＝ギュルダンの定理を用いることで、変形後の液滴の表面積は以下の式によって求めた。

$$S_d = 2\pi lG + \pi \left(\frac{L_B}{2}\right)^2 + \pi \left(\frac{L_T}{2}\right)^2 \quad (3.78)$$

ここで、 $l$ は側面の輪郭線長さ、 $G$ は試料の中心線から輪郭線の重心までの距離、 $L_T$ は試料上部の長さ、 $L_B$ は試料下部の長さである。

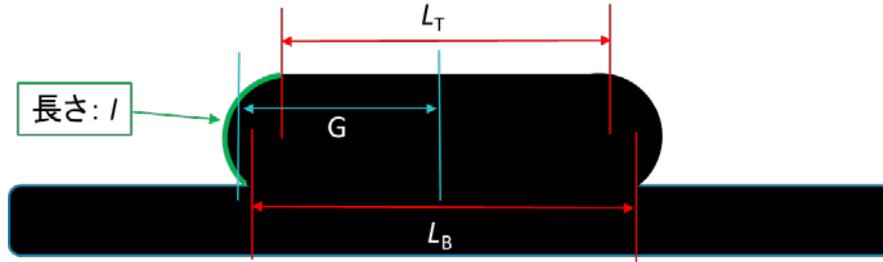


図 3.3-16 : 変形後試料の断面の模型

## (2) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 表面張力評価実験の結果

上記の手法によって、図 3.3-7 に示した 2,811 K と 3,091 K における Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 液滴の衝突挙動の画像を元に、表面張力を計算した。図 3.3-17 に、3091 K における Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の衝突前後の液滴形状を例として示す。

図 3.3-18 に、計算した表面張力を文献値と共に示す。本測定手法で算出した表面張力は、ガス浮遊法で得られた文献値と良く一致していることが分かる。これにより、本研究で考案した液滴衝突法により酸化物融体の表面張力の評価が可能であることが示された。

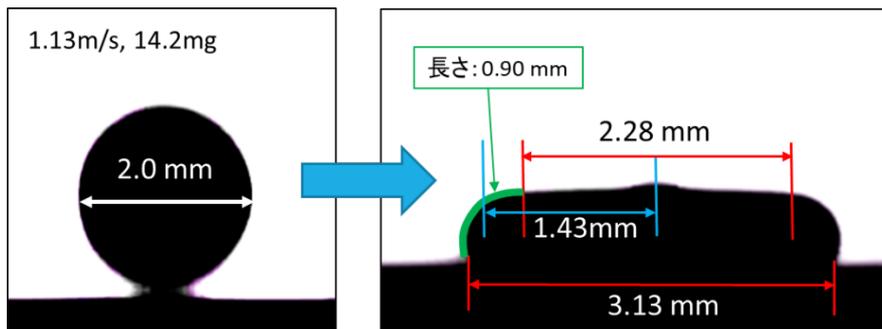


図 3.3-17 : 3091 K の Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 液滴試料の解析例

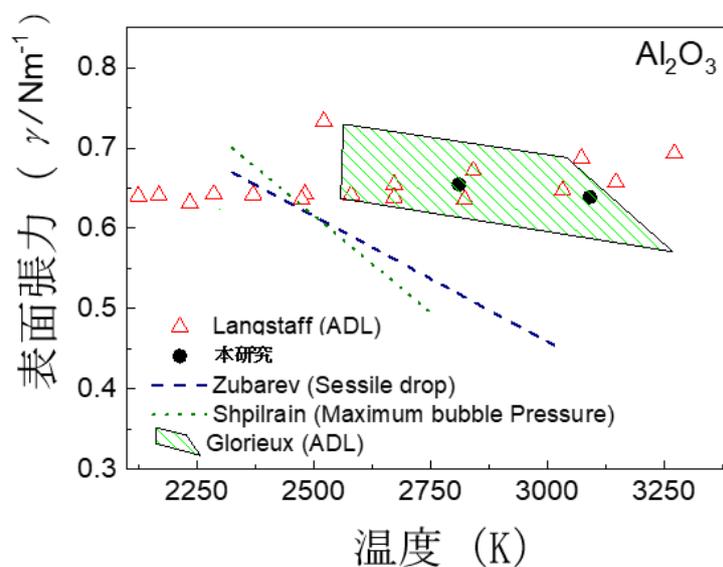
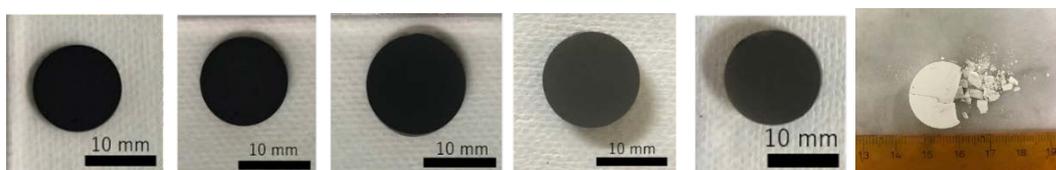


図 3.3-18 : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の表面張力の測定結果

### 3.3.3. 平成 30 年度の実施内容及び成果

#### 3.3.3.1. $(U_{1-x}Zr_x)O_2$ 試料作製方法

$UO_2$  と  $ZrO_2$  (フルウチ化学株式会社、純度 99.99%) の粉末を  $(U_{1-x}Zr_x)O_2$  ( $x = 0.1, 0.2, 0.5, 0.8, 0.9, 1.0$ ) となるように秤量し、 $x = 0.1, 0.2, 0.5, 0.8, 0.9$  試料については混合した後に 200 MPa でコールドプレスし、直径 15 mm の円筒状の成型体を作製した。得られた成型体を Ar フロー雰囲気下で 1600 °C で 24 時間熱処理 (昇降温速度 100 °C/h) し、さらに Ar-1% $H_2$  フロー (0.4 l/min) 雰囲気下で 1500 °C で 8 時間熱処理 (昇降温速度 100 °C/h) し、**図 3.3-19** に示すような緻密な焼結体を得た。 $x = 1.0$  ( $ZrO_2$ ) の試料については、放電プラズマ焼結法を用いて 1300 °C で焼結し、空气中で 1000 °C で熱処理して酸素補填した。これらの焼結体を粉碎し、2 mm 程度のサイズの試料をガス浮遊実験に用いた。



(左から  $x = 0.1, 0.2, 0.5, 0.8, 0.9, 1.0$ 。  $x = 1.0$  の試料については一部粉碎した後の写真)

図 3.3-19 : 作製した  $(U_{1-x}Zr_x)O_2$  試料の写真

#### 3.3.3.2. $(U_{1-x}Zr_x)O_2$ 液滴衝突実験概要と実験方法

平成 28 年度に作製した、分割式コニカルノズルを用いたガス浮遊溶融・液滴落下装置を用いて実験を行った。実験には第 3.3.3.1 で作製した  $(U_{1-x}Zr_x)O_2$  試料を用い、液滴を  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$ , BN 基板へ衝突させる様子を観察することで試料の組成や基板の種類が液滴の衝突挙動へ与える影響を評価した。

実験体系は平成 29 年度に用いたもの (第 3.3.2.2 参照) と同じなので、ここでは概要のみを述べる。**図 3.3-6** に実験体系の概略図を示したように、コニカルノズルからガス (純度 99.9999% Ar, 純度 99.5%  $O_2$ ) を噴出させることで試料をコニカルノズル上に浮遊させた。浮遊した試料は上部から照射した 100 W の  $CO_2$  レーザー (波長 10.6  $\mu m$ ) によって加熱溶融させた。試料の温度は放射温度計 (IR-CAS8CNL, CHINO) により測定する。試料の形状は 1280×1024 ドットで最速 2000 コマ/秒の撮影が可能であるモノクロ CMOS カメラ (HAS-D72M, DITECT) により観察した。バックライトには紫外光ランプ (L9588-02A, 浜松ホトニクス) と波長 370  $\pm$  5 nm のバンドパスフィルターを用いた。コニカルノズルは分割可能であり、分割することで試料を落下させた。落下した試料は下に設置した基板と衝突した際の様子を観察した。基板には  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$ , BN を用いた。

#### 3.3.3.3. $(U_{1-x}Zr_x)O_2$ 液滴衝突実験の結果

$ZrO_2$  液滴を  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$ , BN 製の基板へ衝突させた結果を **図 3.3-20** に示す。 $ZrO_2$  液滴を  $Al_2O_3$  基板に衝突させた場合は、 $ZrO_2$  液滴は基板に付着した。これは、 $Al_2O_3$  と  $ZrO_2$  は共晶系であるため、 $ZrO_2$  液滴と  $Al_2O_3$  基板との境界に共晶反応による反応層が生じたためであると考えられる。 $ZrO_2$  液

滴を  $ZrO_2$  基板に衝突した場合も  $ZrO_2$  液滴は基板に付着したが、これは  $ZrO_2$  の融点よりも高い温度を有する  $ZrO_2$  液滴によって  $ZrO_2$  基板表面が僅かに溶融したためであると考えられる。

一方、BN 基板の場合では  $ZrO_2$  液滴は基板と衝突した後に反跳している。これは、BN が反応性が低く多くの溶融物に対して濡れないことから、溶融  $ZrO_2$  と濡れなかったために反応層が形成されなかったためであると考えられる。以上により、液滴の衝突挙動は基板との反応性が重要な影響を与えることが明らかとなった。

続いて、 $(U_{1-x}Zr_x)O_2$  を BN 製の基板へ衝突させた結果を図 3.3-21 に示す。 $(U_{1-x}Zr_x)O_2$  ( $x = 0.1-0.8$ ) では液滴が形成できなかった。これは、 $UO_2$  の蒸気圧が高いために溶けた箇所から蒸発したためである。融点における蒸気圧を熱力学平衡計算ソフト Fact Sage を用いて計算 (データベースは Fact53) すると、 $Al_2O_3$  では 0.12 Pa,  $ZrO_2$  では 18 Pa であるのに対し、 $UO_2$  では 3100 Pa となっており、これまでに試験を行ってきた  $Al_2O_3$  や  $ZrO_2$  に比べて  $UO_2$  は 2 桁以上高い蒸気圧を有している。蒸発速度は蒸気圧のみで決まるわけではないが、蒸気圧の高い  $UO_2$  は液相になると蒸発が顕著になることが本試験により明らかになった。この結果は、炉内で  $UO_2$  が溶融した場合、多量の  $UO_2$  が蒸発する可能性があることを示唆している。

U の割合が低い  $x = 0.9$  の試料では液滴を落下させることができた。その結果を図 3.3-21 に示すが、BN 基板との衝突挙動後に反跳しており、 $ZrO_2$  と同様の結果となった。なお、蒸発によって冷却するのが早いためか、落下の途中で一部が凝固した。これらの試験により、液滴が落下衝突する際の挙動は基板との反応の有無が大きな影響を与えること、及び  $UO_2$  は蒸発が顕著であることから凝固の挙動へ影響を与える可能性があることが明らかとなった。

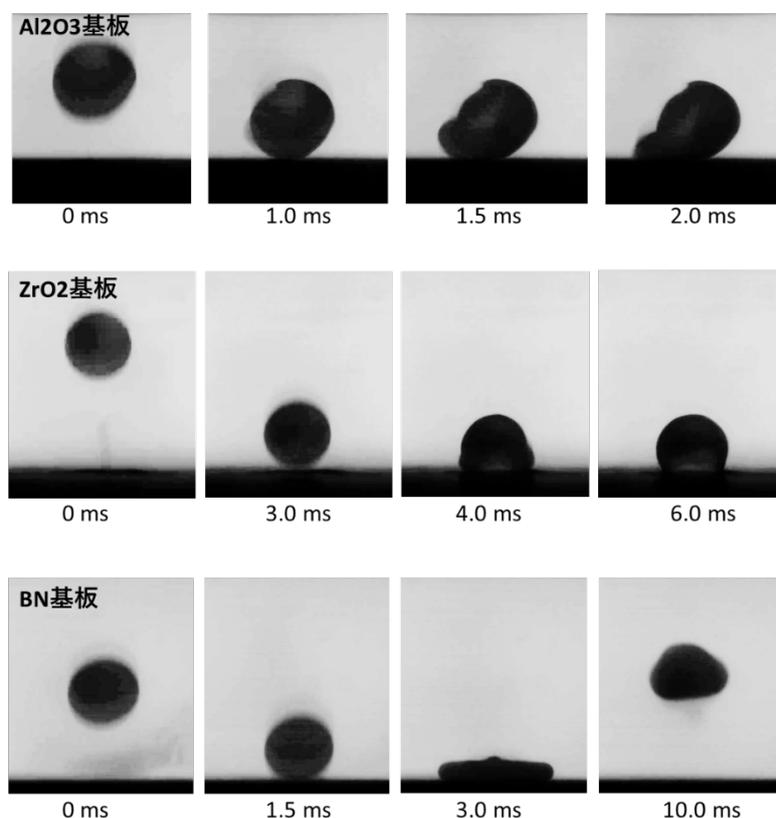


図 3.3-20 :  $ZrO_2$  液滴を  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$ , BN 基板へ衝突させた際の挙動

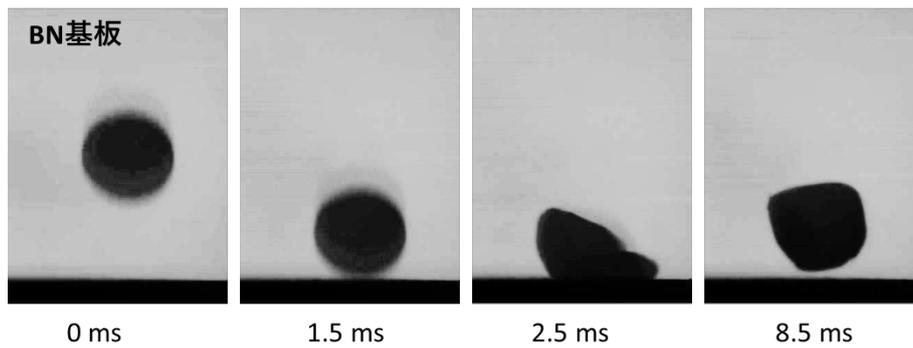


図 3.3-21 :  $(\text{Zr}_{0.9}\text{U}_{0.1})\text{O}_2$  液滴を BN 基板に落下させた様子

### 3.3.3.4. $\text{ZrO}_2$ 融体の粘性評価実験概要と実験方法

本研究では平成 29 年度に実験体系 (図 3.3-9 参照) を構築し (構成する光学部品については第 3.3.2.2 を参照)、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  融体の粘性と密度を測定することに成功した。この実験体系を用い、平成 30 年度は  $\text{ZrO}_2$  融体の粘性と密度の測定を行った。第 3.3.2.3 に示した方法と同様にして得た  $\text{ZrO}_2$  融体の振動減衰時の水平方向の試料径とそれを (3.71) 式によってフィッティングした結果を図 3.3-22 に示す。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  融体の振動減衰時と同様に、 $\text{ZrO}_2$  融体の振動の減衰挙動が (3.69) 式でフィッティングできていることが分かる。

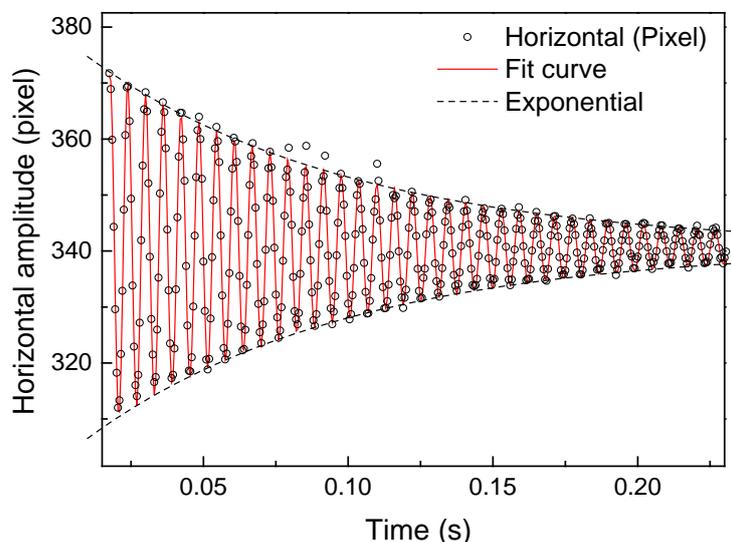


図 3.3-22 : 減衰振動をする溶融  $\text{ZrO}_2$  の水平方向の試料径の時間変化とフィッティング結果

### 3.3.3.5. $\text{ZrO}_2$ 融体の密度・粘性評価実験の結果

図 3.3-23 (a) に、溶融  $\text{ZrO}_2$  の密度の測定結果を示す。溶融  $\text{ZrO}_2$  の密度については、Kohara らによって実験的に評価された値が 1 例のみ報告されている [51] ので、この文献値も図中に示す。本研究で得られた測定値は文献値とほぼ一致しているものの、やや低い値となっていることが分かる。この密度のずれの一因として、試料中の温度勾配の有無が考えられる。本研究では図 3.3-9

に示した通り、試料温度を均一にするために上下からレーザー加熱している。一方、文献 [51] では、試料を上方のみからレーザーを照射することによって加熱しており、試料下部は加熱していないために試料中に大きな温度勾配が生じていることが予想され、これが原因で密度を過大に評価しているものと考えられる。

多くの液体の密度は、温度に対して線形に変化することが知られている。そこで、得られた測定値を直線でフィッティングした結果を図 3.3-23 (a) 中に示す。測定結果は、直線で良くフィッティングできていることが分かる。フィッティングによって得られた、熔融  $ZrO_2$  の密度  $\rho_{l-ZrO_2}$  を表す式は以下の通りである。

$$\rho_{l-ZrO_2} = -(4.10 \pm 0.87) \times 10^{-4}(T - 2988) + (4.69 \pm 0.23) \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (3.79)$$

(2753 K <  $T$  < 3273 K)

図 3.3-23 (b) に、熔融  $ZrO_2$  の粘性の測定結果を示す。熔融  $ZrO_2$  の粘性を実験的に評価したという報告例はないので、Kim らと Alderman らによって分子動力学法 (MD: Molecular Dynamics) によって計算された値 [52] [53] を参考に図中に示す。計算値はいずれも熔融  $ZrO_2$  の粘性を過小評価していたことが分かる。

多くの液体の粘性  $\eta$  は、以下に示す Andrade の式と呼ばれる式で良く表せることが知られている。

$$\eta = \eta_0 \exp\left(\frac{E}{RT}\right) \quad (3.80)$$

ここで、 $\eta_0$  は物質固有の値、 $E$  は活性化エネルギー、 $R$  は気体定数である。この式を用いてフィッティングした結果を図中に示す。測定値は Andrade の式で良くフィッティングできていることが分かる。フィッティングによって得られた熔融  $ZrO_2$  の粘性  $\eta_{l-ZrO_2}$  を表す式は以下の通りである。

$$\eta_{l-ZrO_2} = (0.96 \pm 0.69) \times \exp\left\{\frac{(6.4 \pm 2.0) \times 10^4}{RT}\right\} \text{ (mPas)} \quad (3.81)$$

(3170 K <  $T$  < 3471 K)

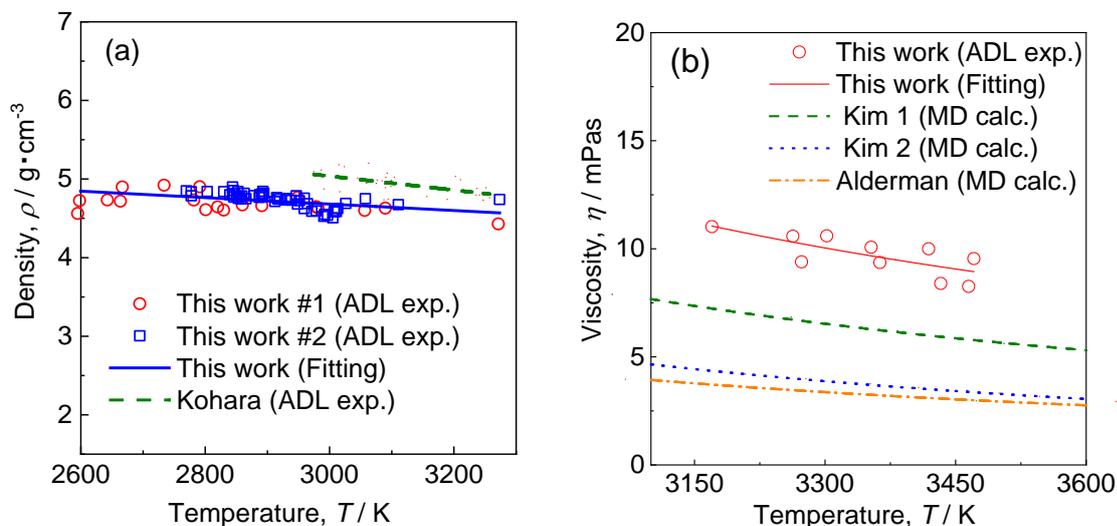


図 3.3-23 : 熔融  $ZrO_2$  の (a) 密度、(b) 粘性の温度依存性

### 3.3.3.6. 新しい粘性評価手法の検討

熔融  $ZrO_2$  の粘性を ADL を用いて評価した際、実験中に試料が蒸発することが測定を困難にする要因となり得ることが明らかとなった。液滴振動法により (3.71) 式で粘性を求めるには、共振周波数を励起する必要がある。振動は音波で励起するため、まず音波の振動数を順に変化させ、振動の様子から共振周波数を決定した上で粘性の測定を行う。しかし共振周波数は試料のサイズに依存するため、試料が蒸発すると共振周波数が変化してしまうという問題が生じる。 $Al_2O_3$  の融点での蒸気圧は熱力学平衡計算ソフト Fact Sage (データベースには Fact53) を用いて算出すると 0.12 Pa となり、 $ZrO_2$  では 18 Pa であるので、 $Al_2O_3$  と比べて  $ZrO_2$  では試料の蒸発が顕著であり、これが熔融  $ZrO_2$  の粘性の測定が困難であった原因である。

本研究では、できる限り短時間で測定が完了できるように実験プロセスを調整することで熔融  $ZrO_2$  の粘性の測定に成功した。しかし、 $UO_2$  の融点での蒸気圧は  $ZrO_2$  よりも高い (3100 Pa, FactSage を用いた計算による) ため、 $UO_2$  を含む熔融物については音波励起による液滴振動法による粘性測定は極めて難しいと考えられる。

蒸発の影響を抑えるためには、より短時間で測定を完了させれば良い。音波励起の液滴振動法で最も時間がかかるのが、共振周波数を探すプロセスである。すなわち、振動を瞬時に励起することができれば、極短時間で測定を完了できる可能性がある。振動を瞬時に励起する方法として、液滴の反跳後の振動が利用できる可能性がある。早稲田大学のグループが示した通り (第 3.1.5 項参照)、反跳後の液滴の振動は粘性と表面張力との相関がある。さらに、このような反跳は液滴落下装置を用いれば観察できる。図 3.3-24 に、液滴落下装置を用いて基板に落下させ、反跳した  $Al_2O_3$  液滴の様子を示す。反跳後に  $Al_2O_3$  液滴が振動している様子が分かる。すなわち、液滴が反跳した際の振動の挙動から瞬時に粘性の測定ができる可能性がある。以上により、早稲田大学との連携により、蒸気圧の高い試料 (例:  $UO_2$ ) にも適用可能であると考えられる新しい方法で粘性の評価ができる可能性を見出した。

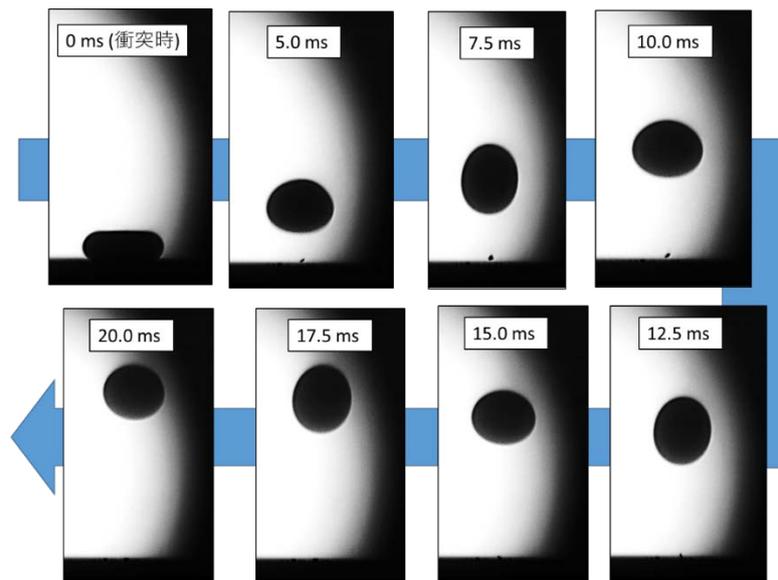


図 3.3-24 : 衝突後に反跳して振動している  $Al_2O_3$  液滴の様子

#### 3.3.4. まとめ

UO<sub>2</sub> 流下実験による基礎データ取得のために、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O-ZrO<sub>2</sub>、(U<sub>1-x</sub>Zr<sub>x</sub>)O<sub>2</sub>等の粉末試料を高温で焼結し、得られた焼結体を粉砕して小片を取り出し、試料を作製する技術を確認した。作製した装置を用いて、試料を落下させて基板に衝突させる方法とハンマーを試料へ衝突させる方法を検討した結果、試料を落下させて基板に衝突させる方法を用いることでAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>液滴が変形し広がる様子が観察できることが明らかになった。一方、UO<sub>2</sub>リッチな試料 (x<0.9)ではレーザー照射により溶融した箇所から試料が蒸発し、液滴を形成できなかった。これは、UO<sub>2</sub>の高い蒸気圧によるものであると考えられる。この結果は、炉内でUO<sub>2</sub>が溶融した場合、多量のUO<sub>2</sub>が蒸発する可能性があることを示唆している。

作製したガス浮遊溶融装置と分割式コンカルノズル装置を用い、液滴衝突実験を行った。試料が溶融した後にノズルを分割し、液滴試料をAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基板上に落下させた。液滴試料が基板に衝突して変形していく様子を、ハイスピードカメラで撮影した。試料の組成を変化させた実験(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 100, 80, 60 wt%-ZrO<sub>2</sub>)と温度を変化させた実験(2811, 3091 K)を行い、温度や組成依存性を評価可能であることを示した。これにより、試料のspreading観察技術を確認した。

更に、溶融物のspreading挙動評価のためには粘性や表面張力といった物性が極めて重要であることから、ガス浮遊溶融装置を利用して酸化物融体の物性(粘性、表面張力等)測定技術の確認に取り組んだ。既往研究を参考に、ガス浮遊させた液滴試料に対して液滴振動法を適用することにより、粘性及び密度を測定する装置を作製した。本装置を用いてAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>融体の密度及び粘性を測定したところ、文献値と良く一致する結果が得られた。以上により、酸化物融体の物性(粘性、密度、表面張力)測定技術を確認した。さらに、溶融ZrO<sub>2</sub>の粘性と密度の温度依存性の測定に成功した。特に粘性については、世界で初めての実験値となる。

ZrO<sub>2</sub>よりも蒸気圧が高いUO<sub>2</sub>を含む物質の物性測定を行うためには、より短時間で測定できる新しい手法が必要である。そこで、液滴が基板に衝突して反跳した際に振動していることに着目し、早稲田大学との連携によりこの振動の挙動から粘性が評価できる新たな手法(液滴衝突法)の可能性を見出した。

### 3.4. 研究推進

平成 28 年度は、大阪大学で実施する  $UO_2$  流下試験による基礎データ取得の実施方針等の確認のため、研究代表者及び大阪大学の実施担当者による打合せを行った（大阪大学吹田キャンパス・平成 28 年 11 月 28 日及び平成 29 年 2 月 16 日）。また、事業全体の進め方、及び各再委託先での実施状況及び計画を確認するために、研究代表者と各再委託先の担当者全員による打合せを実施した（電力中央研究所泊江地区・平成 28 年 12 月 7 日、JST 東京本部別館・平成 28 年 12 月 26 日）。

平成 29 年度は、各研究項目の代表者で集まり（平成 29 年 9 月 15 日）、研究計画及び進捗状況を確認し、解析条件及び実験条件の整合性を確認した。その他、適時メール、TV 会議等で円滑な研究推進を図った

平成 30 年度は、各研究項目の代表者で集まり（平成 30 年 9 月 5 日）、研究計画及び進捗状況を確認し、解析条件及び実験条件の整合性を確認した。その他、適時メール、TV 会議等で円滑な研究推進を図った。

以上のように研究者間の連携を図り、得られた研究成果を適時外部発表した。本研究期間（平成 28-30 年度）中に得られた成果のうち、査読付学術論文誌には 6 件、査読付国際会議 proceedings には 4 件掲載された。

#### 査読付学術論文誌掲載

- (1) Guangtao Duana, Akifumi Yamajia, Seiichi Koshizuka “A novel multiphase MPS algorithm for modeling crust formation by highly viscous fluid for simulating corium spreading” Nuclear Engineering and design Vol. 343 (2019) pp218-231.
- (2) G. Duan, S. Koshizuka, A. Yamaji, B. Chen, X. Li, T. Tamai, “An Accurate and Stable Multiphase Moving Particle Semi-implicit Method Based on Corrective Matrix for All Particle Interaction Models” , Int J Numer Methods Eng. 2018; Vol1115: pp 1287-1314.
- (3) Y. Yasumura, A. Yamaji, M. Furuya, Y. Ohishi, G. Duan, “Investigation on influence of crust formation on VULCANO VE-U7 corium spreading with MPS method” , Annals of Nuclear Energy Vol1107(2017) 119-127.
- (4) Xin Li , Akifumi Yamaji, “Three-dimensional numerical study on the mechanism of anisotropic MCCI by improved MPS method” , Nuclear Engineering and design Volume 314, 1 April 2017, Pages 207-216.
- (5) Yukihiro Suzuki, “Bracket Formulations and Energy and Helicity Preserving Numerical Methods for the Three-Dimensional Vorticity Equation” , Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering VOL. 317(2017) p. 174-225.
- (6) Yukihiro Suzuki, “Bracket Formulations and Energy and Helicity Preserving Numerical Methods for Incompressible Two-Phase Flows” , Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering VOL. 317(2017) p. 174-225.

#### 査読付国際会議 proceedings 掲載

- (1) K.Uchida, G.Duan, A.Yamaji, “Numerical Investigation of the Stop-and-Go Mechanism in FARO L26S Spreading Experiment by MPS Method” , Proceeding of NUTHOS-12 (Paper No.980), October 14-18, 2018, Qingdao, China.
- (2) J.Murata, X.Li, A.Yamaji, “Improvement of Numerical Analysis of Molten Core-Concrete Interaction with Top Water Injection by MPS Method” , Proceeding of NUTHOS-12 (Paper No.966), October 14-18, 2018, Qingdao, China.
- (3) Jubaidah, G.Duan, A.Yamaji, “Numerical Investigation on VULCANO VE-U7 Corium Spreading Over Ceramic/Concrete Substrates with MPS Method” , Proceeding of NUTHOS-12 (Paper No.1053), October 14-18, 2018, Qingdao, China.
- (4) G.Duan, A.Yamaji, S.Koshizuka, “A Novel Approach for Crust Behaviors in Corium Spreading Based on Multiphase MPS Method” , Proceeding of NUTHOS-12 (Paper No.945), October 14-18, 2018, Qingdao, China.

## 4. 結言

本業務では、原子力発電技術の安全性・信頼性を向上し、炉心溶融物の物理現象の理解に立ち戻った議論を深めるために、溶融物の伝熱・流動・相変化を機構論的にモデル化できる MPS 法の改良と解析及び実験により、Ex-Vessel 溶融物挙動理解の抜本的な深化に取り組んだ。MPS 法による計算機実験、模擬溶融物流下実験、UO<sub>2</sub> 流下実験により、MPS 法の解析能力を検証し、機構論的な Ex-Vessel 溶融物挙動の予測のための課題を明らかにすることを目的として実施した。以下に 3 カ年計画の全期間を通じた業務の実績を述べる。最後に今後の展望を述べる。

### 4.1. MPS 法による Ex-Vessel 溶融物挙動の理解の深化

#### (1) MPS 法による Spreading 解析モデルの検討と理解の深化（平成 28-30 年度）

平成 28 年度は、Ex-Vessel 溶融物の spreading 挙動を解析する MELTSPREAD コードの過去の検証に用いられた実験マトリックスを精査した。MPS 法による spreading 解析の主な検討対象は VULCANO VE-U7 実験とし、MPS 法の三次元解析体系を構築した。粘性の変化モデルに Ramacciotti モデルを組み込んだ試解析では、時間進展に伴い、溶融物先端の流動速度が低下する様子が確認できた。

平成 29 年度は、平成 28 年度に選定した VULCANO VE-U7 の spreading 実験を MPS 法により解析した。spreading 全般を支配すると考えられる因子と spreading の停止を支配すると考えられる因子がどのように spreading に影響するのかを定量的に明らかにするため、MPS 法に新たにクラスト形成モデルを組み込み、解析を実施した。新たな MPS 法による VULCANO VE-U7 実験の解析結果と実験データを分析し、同実験の spreading は、流動初期には重力／粘性支配の流動であるが、流動先端に形成されるクラストと流動の固液相互作用の結果、クラストが次第に発達し、やがてバルク流動をせき止めて最終的に流動停止に至る機構が考えられることが示された。解析結果は実験データや過去の研究と良く整合しており、新たな MPS 法の spreading 解析手法の妥当性が示された。更に、当初は想定していなかった新たな MPS 法のアルゴリズムを考案し、クラストの再溶融だけでなく、実機事故条件で想定されるクラストの機械的な破断のモデル化も可能とする知見が得られた。

当初の計画は予定通り平成 29 年度までに全て達成したが、平成 28 年度に考案した新たな MPS 法のアルゴリズムを活用し、クラストの再溶融だけでなく、実機事故条件で想定されるクラストの機械的な破断のモデル化に成功した。この新モデルを MPS 法に組み込み、FARO L-26S 実験で観測された、クラスト形成による流動の一時停止と、クラスト破断による再流動を機構論的に示すことに世界で初めて成功し、当初の想定を超える成果が得られた。

#### (2) MPS 法による MCCI 解析モデルの検討と理解の深化（平成 28-29 年度）

平成 28 年度は、Ex-Vessel 溶融物による MCCI を解析する CORQUENCH コードの過去の検証に用いられた実験マトリックスを精査した。MPS 法による MCCI 解析の主な検討対象は三次元 MCCI 実験である VULCANO VB-U7 実験とし、MPS 法の三次元 MCCI 実験体系を構築した。新たにクラスト非等方形形成のモデルを導入した試解析では、横方向へのコンクリート浸食量が下方方向へのそれに比べて大きくなる非等方形性が確認できた。

平成 29 年度は、平成 28 年度に選定した三次元 MCCI 実験である VULCANO VB-U7 実験を MPS 法により解析した。非等方浸食をもたらすと考えられる因子を MPS 法の三次元 MCCI 解析モデルに組み込み、どのようにこれらが非等方浸食をもたらすのかを検討した。解析結果と実験結果の比較から新たな MPS 法の MCCI 解析手法の妥当性を示した。新たな MPS 法による VULCANO VB-U7 実験の解析結果と実験データを分析し、溶融物・クラスト相互作用の違いが MCCI におけるコンクリートの等方浸食／非等方浸食の違いをもたらす機構を検討した。その結果、珪質岩系コンクリートでは粗骨材が側壁クラスト形成を阻害する一方で、底部ではヒートシンクの役割を果たし、クラストを安定化させ、非等方浸食をもたらす機構が考えられることが示された。解析結果は実験データや過去の研究と良く整合しており、新たな MPS 法の MCCI 解析手法の妥当性が示された。

### (3) 数学による離散化手法の検討（平成 28-30 年度）

平成 28 年度は、非圧縮単相流れに対して解析力学と非平衡熱力学に基づいた定式化を行った。具体的には GENERIC に習い歪対称の Poisson 作用素に正定値対称の散逸作用素を組み合わせ、Poisson 括弧と散逸括弧を定式化できた。また、その定式化によって表されるメカニズム（すなわち作用素の歪対称性と正定値対称性）を離散化後も正確に保存するような数値解法（構造保存型数値解法）を離散変分導関数法の手法に基づいて提案できた。

平成 29 年度は、平成 28 年度に考案した構造保存型数値解法に対して具体的な数値計算アルゴリズムを、メッシュ法をベースに開発し、それに基づいて計算コードを作成した。周期渦列の崩壊過程のベンチマーク解析により、微小攪乱を導入することによって周期渦列を崩壊させ、そのような乱れた流れ場でも運動エネルギー等の保存量が精密に保存することを確かめ、エンストロフィーが増加しても、エネルギーは減衰せず（保存し）、ヘリシティも保存していることを確かめた。

平成 30 年度は、平成 29 年度に開発したメッシュ法による構造保存型数値解法に対して行ったベンチマーク解析の知見を活用し、Hamilton 力学的定式化による MPS 法（HMPS 法）に対しても同様なベンチマーク解析を実施した。メッシュ法に基づく構造保存型数値解法と同様に HMPS 法でもエネルギーを保存させることに成功した。一方、メッシュ法とは異なり、HMPS 法では速度勾配に依存する量（例：ヘリシティ）の保存性がないため、渦列が早期に崩壊することが明らかになった。このことに起因する MPS 法の解析精度の悪化を改善するために、速度勾配テンソルを未知関数とする定式化を検討した。

### (4) MPS 法によるデブリ流下・集中挙動の計算機実験（平成 29-30 年度）

平成 29 年度は、電力中央研究所で実施された模擬デブリ流下実験に対応する実験体系の CAD データ及び模擬デブリの流下条件、物性データを取得し、MPS 法の解析体系を構築した。電力中央研究所と連携して模擬デブリの流下位置、量、粘性等の実験パラメータを定めた。MPS 法の等温解析の結果、界面の正確な捕捉に十分な解像度が得られていることと、模擬デブリの流下時に数値的な不連続性が生じないことを確認し、適切な実験条件と解析条件を定めた。これらの条件では、模擬デブリ流下・集中挙動の解析結果は測定データと良く一致し、MPS 法の解析の妥当性を確認した。

平成 30 年度は、平成 29 年度までに整備した MPS 法の解析コードを用い、電力中央研究所で実施された伝熱及びアブレーションを伴う模擬デブリ流下試験に対応する MPS 法の解析を実施した。模擬デブリの流下位置と量は平成 29 年度に実施した条件と同じ条件を基準に、流下流量を変更したケースも試験及び解析の対象とした。これらの条件で、模擬ペDESTAL床に有意なアブレーションが生じるように模擬デブリの初期温度を定めた。いずれのケースでも MPS 法による解析結果は実験結果と定性的に良く一致していることを確認した。また、本事業の範囲には定量的な予測精度を向上するための大規模並列計算は含まれていないが、適切な乱流モデル・パラメータを利用することで、限られた計算機資源の制約下でも定量的な解析精度の向上が可能であることを示すことに成功した。

#### (5) 新しい高温融体粘性評価手法検討のための解析（平成 30 年度）

当初は計画していなかったが、大阪大学で実施された液滴衝突実験に対応する解析（Front Tracking 法）を早稲田大学で実施し、蒸気圧の高い試料（例：UO<sub>2</sub>）にも適用可能であると考えられる新しい方法で粘性の評価ができる可能性を見出し、当初の想定を超える成果が得られた。

#### 4.2. 模擬デブリ流下実験による MPS 解析結果の妥当性の検証（再委託先：電力中央研究所）

平成 28 年度は、模擬デブリが床面に衝突して堆積し、流出する現象を定量的に示すために、模擬デブリの三次元流動の可視化手法を検討した。可視化手法を検討するために、床面構造として格納容器ペDESTALを縮小した三次元 CAD 図を作成し、三次元造形した。熔融物の界面形状の可視化のために複数の光学カメラを設置した。又、熔融物の流出量を時間の関数として定量化するために、二次元レーザー変位計及び微小重量計を設置した。これらを用いて、熔融物の流出量を時間の関数として定量化した。早稲田大学と連携し、実験体系やこれらの CAD 図や測定データは MPS 法による計算機実験との整合性を備えていることを確認した。

平成 29 年度は、平成 28 年度に構築した体系を用いて、熔融物による床構造のアブレーションを伴わない等温条件で実験（等温実験）を実施した。早稲田大学と連携し、模擬デブリの流下位置、量、粘性等の実験パラメータを定め、デブリの三次元流下挙動の可視化データを取得した。異なるスケールで実験し、スケール効果も分析した。いずれのケースでもシリコン油流下部の延長線上は液膜が薄く、横方向外縁では慣性力を失って水力跳躍により盛り上がった。このような光学観察と重量物時系列データが得られたことから、作製した装置及び実験体系が MPS 法解析の妥当性確認に必要なデータを与えることができることを確認した。

平成 30 年度は、平成 29 年度と同様な条件で床材に融点の低い材料を用い、模擬デブリによる床のアブレーションを伴う流下挙動を可視化し、MPS 法の解析結果の検証データを取得した。模擬デブリの流下位置と流量は等温実験と同じ条件を基準にした。これらの条件で、模擬ペDESTAL床に有意なアブレーションが生じるように模擬デブリの初期温度を定めた。光学カメラとサーモグラフィーを用いて流下挙動を温度分布と共に可視化し、サンプルピット部及び搬出口からの流出量を、重量計を用いて時系列計測し、MPS 法の解析の妥当性確認に適したデータを取得した。

#### 4.3. UO<sub>2</sub> 流下実験による基礎データ取得（再委託先：大阪大学）

平成 28 年度は、液滴が固体表面に衝突した際の拡がり挙動を観察するため、ガス浮遊法によってコニカルノズル上に液滴試料を浮遊させた上で、以下の 2 つの方法を検討した。1 つ目は、コニカルノズルを分割することで試料を下へ落下させ、コニカルノズル下部に設置した基板へ衝突させる方法である。2 つ目は、コニカルノズル上に浮遊した液滴試料に側面からハンマーを衝突させる方法である。これらの方法の検討のため、分割式のコニカルノズル、加熱レーザー用光学系、液滴試料に衝突させるハンマー、衝突した試料の拡がり挙動を観察するためのハイスピードカメラとレンズ、バックライト、液滴試料の温度を測定するための放射温度計から構成される液滴衝突試験装置を作製した。その結果、試料を落下させて基板に衝突させる方法を用いることで Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 液滴が変形し拡がる様子が観察できることが明らかになり、平成 29 年度以降はコニカルノズルを分割する方法を用いて検討を継続することとした。

平成 29 年度は、UO<sub>2</sub> の模擬物質を用い、平成 28 年度に作製したガス浮遊溶融装置によって spreading の様子を観察することで、試料の作製から spreading 観察までの技術を確認した。UO<sub>2</sub> の模擬物質として ZrO<sub>2</sub> と Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉末を混合して焼結し、得られた焼結体を粉砕して小片を取り出すことで、ガス浮遊溶融実験に用いることが可能な、組成を制御した試料が作製可能であることを確かめた。得られた ZrO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 試料を用いて、平成 28 年度に作製したガス浮遊溶融装置と分割式コニカルノズル装置により、液滴衝突実験を行った。試料の組成や温度を変化させた実験を行い、液滴試料が基板に衝突して変形していく様子を観察した。これにより、spreading 観察までの技術を確認した。想定外の成果として、ガス浮遊溶融装置を利用して溶融物の粘性、密度、表面張力を評価する技術を確認した。粘性と密度の測定技術は文献を参考にしたものであるが、表面張力の評価技術は本研究において新たに考案した技術である。

平成 30 年度は、(U<sub>1-x</sub>Zr<sub>x</sub>)O<sub>2</sub> ( $x = 0.1-1.0$ ) 試料を、水素ガスを混合した還元雰囲気中で焼結して作製し、ガス浮遊溶融装置を用いて浮遊溶融させ、基板上へ落下させて spreading の様子を観察した。ZrO<sub>2</sub> の液滴試料を Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基板上に落下させた場合は ZrO<sub>2</sub> 液滴が Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基板へ付着したのに対し、BN と ZrO<sub>2</sub> 基板に落下させた場合は液滴が反跳した。UO<sub>2</sub> を混ぜた試料では、 $x = 0.9$  の試料では ZrO<sub>2</sub> と同様の結果となった。これらの試験により、液滴が落下衝突する際の挙動は基板との反応の有無が大きな影響を与えることや、UO<sub>2</sub> は蒸発が顕著であることが明らかとなった。さらに、ZrO<sub>2</sub> の粘性と密度の測定に世界で初めて成功し、早稲田大学との連携により、蒸気圧の高い試料（例：UO<sub>2</sub>）にも適していると考えられる新しい方法で粘性の評価ができる可能性を見出し、当初の想定を超える成果が得られた。

#### 4.4. 今後の展望

本研究により、従来のオイラー法に基づく解析とは異なるラグランジュ法に基づく MPS 法の改良と解析により、原子炉過酷事故時の溶融物挙動の理解の深化と、溶融物基礎物性データ取得手法の確立に成功した。今後は、本研究で参照した VULCANO 実験施設を有する仏国の原子力・代替エネルギー庁（CEA）との連携や、従来のオイラー法に基づく THEMA コード等と本研究で改良した MPS 法によるベンチマーク解析等によるさらなる溶融物挙動理解の深化が期待できる。また、福島第一原子力発電所の燃料デブリの分布や性状を推定に資する MPS 法による解析や、推定精度向上のために必要な新たな実験の設計等に本研究で改良した MPS 法を活用することも有用と考えら

れる。例えば、2号機や3号機の格納容器ペDESTALの堆積物の深さ方向の性状は表面的な現地調査画像や断片的なサンプリングからは推定が困難であるが、本研究で改良したMPS法を活用し、これまでに確認されている堆積物の非一様な分布がどのようにもたらされたのかを検討することで、深層デブリの性状の推定が可能と考えられる。また、本研究により、ガス浮遊法を用いて極めて融点が高い物質である $ZrO_2$ の粘性等の物性測定に成功した。今後は、本研究で確立した技術を用いた $UO_2$ やボライド等の重要な炉心溶融物の物性の解明が期待できる。

人材育成面では、本研究に直接に参加した若手の育成のみならず、早稲田大学や大阪大学からは博士後期課程を含む学生20名以上が原子炉過酷事故、安全研究に取り組んでおり、日本と世界の将来の原子力エネルギーの安全な平和利用に大きく貢献すると期待される。

## 参考文献

- [1] “Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (BSAF Project),” NEA/CSNI/R(2015)18, February (2016)..
- [2] “廃炉・汚染水対策事業事務局,” (<http://dccc-program.jp/>), (accessed 2016/4/11).
- [3] R. Wachowiak et al., “Modular Accident Analysis Program (MAAP) - MELCOR Crosswalk Phase 1 Study,” EPRI 3002004449, Technical Update, November (2014)..
- [4] 岡芳明, 他, “原子炉容器下部ヘットの溶融物挙動の機構論的研究,” 文部科学省「原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブ」, (平成 24-26) .
- [5] J.J. Foit et al., “Similarity solutions for non-isothermal spreading. KATS experiments and CORFLOW results,” Proc. of ICONE-7, Tokyo, Japan., 1999.
- [6] B. Sehgal, “Nuclear Safety in Light Water Reactors,” Academic Press, Boston, United States of America, pp. 307-424., 2012..
- [7] M. Cranga et al., “Towards an European consensus on possible causes of MCCI ablation anisotropy in an oxidic pool,” Annals of Nuclear Energy 74 (2014) 72-88, 2014.
- [8] K. Robb , M. Francis, “Enhanced Ex-Vessel Analysis for Fukushima Daiichi Unit 1,” ORNL/TM-2012/455, February (2013).
- [9] S. Koshizuka , Y. Oka, “Moving-Particle Semi-Implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid,” Nuclear Science and Engineering 123, 421-434., 1996.
- [10] C. Journeau, E. Boccaccio, C. Brayer, G. Cognet, J.-F. Haquet, C. Jégou, P. Piluso , J. Moneris, “Ex-vessel corium spreading: results from the VULCANO spreading tests,” Nuclear Engineering and Design, 223, pp. 75-102, (2003)..
- [11] C. Journeau, J.-F. Haquet, B. Spindler, C. Spengler , J. Foit, “The VULCANO VE-U7 Corium spreading benchmark,” Progress in Nuclear Energy, 48, pp. 215-234 , (2006)..
- [12] X. Li , A. Yamaji, “A numerical study of isotropic and anisotropic ablation in MCCI by MPS method,” Journal of Progress in Nuclear Energy Vol.90, pp. 46-57, 2016..
- [13] 鈴木幸人 , 越塚誠一, “ハミルトニアンに基づく粒子法による定在波の解析,” 日本機械学会論文集 (B編) 74 巻 741 号, (2008-5) .
- [14] M. T. Farmer, “Melt Spreading Code Assessment, Modifications, and Applications to the EPR Core Catcher Design,” Argonne National Laboratory, ANL-09/10, March 2009.
- [15] M. Ramacciotti, C. Journeau, F. Sudreau , G. Cognet, “Viscosity models for corium melts,” Nuclear Engineering and Design, 204, pp. 377-389 , (2001).
- [16] M.T.Farmer et al., “The CORQUENCH Code for Modeling of Ex-Vessel Corium Coolability under Top Flooding Conditions Code Manual - Version3.03. OECD/MCCI-2010-TR03,” Argonne National Laboratory, Argonne, USA, (2011).
- [17] T. Sevón, C. Journeau , L. Ferry, “VULCANO VB-U7 experiment on interaction between

- oxidic corium and hematite-containing concrete,” *Ann. Nucl. Energy* 59, 224-229, (2013)..
- [18] M. Grmela , H. C. Öttinger, “Dynamics and thermodynamics of complex fluids. I. Development of a general formalism,” *Phys. Rev. E* 56, 6620-6632 , (1997).
- [19] X. Sun, M. Sakai , e. a. K. Shibata, Numerical modeling on the discharged fluid flow from a glass melter by a Lagrangian approach, *Nucl. Eng. Des.*, 248, pp. 14-21, (2012).
- [20] G. Duan , B. Chen, Stability and accuracy analysis for viscous flow simulation by moving particle semi-implicit method, *Fluid Dynamics Research*, 45 (3), pp. 1-15, (2013).
- [21] C. Meneveau, T. Lund , W. Cabot, A Lagrangian dynamic subgrid-scale model of turbulence, *J. Fluid Mech.*, 319 (1), pp. 353-385 , (1996).
- [22] E. Verhulp, B. V. Rietbergen , e. a. R. Müller, Micro-finite element simulation of trabecular-bone post-yield behaviour-effects of material model, element size and type, *Comput. Methods Biomech. Biomed. Engin.*, 11 (4), pp. 389-395 , (2008).
- [23] A. Ponter , M. Engelhardt, Shakedown limits for a general yield condition: implementation and application for a von Mises yield condition, *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 19 (3), pp. 423-445 , (2000).
- [24] W.Tromm, J.J.Foit , D.Magallon, Dry and Wet Spreading Experiments with Prototypic Material at the FARO Facility and Theoretical Analysis, OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, Karlsruhe, Germany, 15-18 November 1999.
- [25] P. Bernard , J. Wallace, Turbulent flow: Analysis, Measurement, and Prediction, *J. Fluid Mech.* (2003), vol. 478, pp. 344-345, Cambridge University Press., 2003.
- [26] J. E.Gronager, A. J.Suo-Anttila, D. R.Bradley , J. Brockmmn, “ TURCI: Large Scale Metallic Melt-Concrete Interaction Experiments and Analysis,” NUREG/CR-4420 (SAND85-0707), Sandia National Laboratories, USA. , 1986..
- [27] e. E.R.Copus, “Core-Concrete Interactions Using Molten Steel with Zirconium on a Basaltic Basemat: The SURC-4 Experiment,” NUREG/CR-4994, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM., 1989. .
- [28] E.R.Copus, R.E.Blose, J.E.Brockmann , et al., “Core-Concrete Interactions Using Molten UO<sub>2</sub> with Zirconium on a Basaltic Basemat, The SURC-2 Experiment.,” Sandia Nat. Lab. Report NUREG/CR-5564, SAND90-1022., 1992. .
- [29] R.E.Blose, J. E.Gronager, A. J.Suo-Anttila , et al., “SWISS: Sustained Heated Metallic Melt/Concrete Interaction with Overlying Water Pools,” NUREG/CR-4727, SAND85-1546., 1987..
- [30] D.H.Thompson , et al., “Thermal Hydraulic Aspects of the Large-scale Integral MCCI Test in the ACE Program, Second OECD (NEA) CSNI Specialist Meeting on Molten Core Debris-Concrete Interactions,” Karlsruhe, Germany., April 1-3, 1992..

- [31] B. Spencer , et al., “ Results of MACE Tests M0 and M1,” Proceedings of Second OECD (NEA), CSNI Specialist Meeting on Molten Core Debris-Concrete Interactions, April 1, 1992..
- [32] M.T.Farmer, S.Lomperski, D.J.Kilsdonk , et al., “OECD MCCI Project 2-D Core Concrete Interaction (CCI) Tests: Final Report.,” OECD/MCCI-2005-TR05, Argonne National Laboratory, Argonne, USA., 2006..
- [33] C.Journeau , J.F.Haquet, “Convection heat transfer anisotropy in a bubbling viscous pool-application to molten core-concrete interaction.,” Nucl. Eng. Des. 239, 389-394., 2009..
- [34] Y.Maruyama, Y.Kojima, M.Tahara , et al., “A study on concrete degradation during molten core/concrete interactions.,” Nucl. Eng. Des., 236, 2237-2244., 2006..
- [35] L.Ferry, M.Breton, J.Moneris , et al., “Corium-concrete interactions in an oxide pool in the VULCANO facility: VB-U7 test - FeSiCo (EPR) concrete.,” DEN Technical Document, DEN/DTN/STRI/LMA/NT/2010/002/0, CEA Cadarache, France., 2010..
- [36] Z. Bazant , M. M. F. Kaplan, Concrete at High Temperatures: Material Properties and Mathematical Models, Longman Group, Essex, pp. 412. ISBN 0-582-08626-4., 1996.
- [37] M. Chase, NIST-JANAF Thermochemical Tables. 4th edition, Journal of Physical and Chemical Reference Data, Monograph No. 9, Parts I and II, pp.1952, 1998.
- [38] 松尾 , 宮武, “微分方程式に対する構造保存数値解法,” 日本応用数学会論文誌, 22 (2012)、 pp. 213-251..
- [39] E. Hairer, C. Lubich , G. Wanner, “Geometric Numerical Integration,” 2nd ed., Springer, 2006..
- [40] 降旗 , 森, “偏微分方程式に対する差分スキームの離散変分による統一的導出,” 日本応用数学会論文誌, 8 (1998)、 pp.317-340..
- [41] P. J. Olver, “A nonlinear Hamiltonian structure for the Euler equations,” J. Math. Anal. Appl. , 89 (1982), pp.233-250.
- [42] H. C. Öttinger, “Beyond Equilibrium Thermodynamics,,” Wiley, 2005.
- [43] P. J. Morrison, “Thoughts on brackets and dissipation: old and new,” J. Phys.: Conference Series , 169 (2009), 012006.
- [44] 森田, “微分形式の幾何学,” 岩波書店, 2005.
- [45] K. Lipnikov, G. Manzini , M. Shashkov, “Mimetic finite difference method,” J. Comput. Phys. , 257 (2014), pp.1163-1227..
- [46] 越塚, “数値流体力学,” 培風館,, 1997.
- [47] M. Kondo, S. Koshizuka, K. Suzuki , M. Takimoto, Surface tension model using inter-particle force in particle method, ASME/JSME 2007 5th Joint Fluids Engineering Conference, American Society of Mechanical Engineers, pp. 93-98, (2007).

- [48] G. Duan , B. Chen, Large Eddy Simulation by particle method coupled with Sub-Particle-Scale model and application to mixing layer flow, *Applied Mathematical Modelling*, vol. 39, no. 10-11, pp. 3135-3149, 2015.
- [49] A. Tartakovsky , P. Meakin, Modeling of surface tension and contact angles with smoothed particle hydrodynamics, *Physical Review E* 72, 026301 (2005) .
- [50] D. Langstaff, et. al., *Rev. Sci. Instrum.* 124901, (2013)..
- [51] S. Kohara, J. Akola, L. Patrikeev, M. Ropo, K. Ohara, M. Itou, A. Fujiwara, J. Yahiro, J. Okada, T. Ishikawa , A. Mizuno, Atomic and electronic structures of an extremely fragile liquid, *Nat. Commun.* 5 (2014) 1-8.
- [52] W. Kim, J. Shim , M. Kaviani, Thermophysical properties of liquid UO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub> and corium by molecular dynamics and predictive models, *J. Nucl. Mater.* 491 (2017) 126-137., 2017.
- [53] O. Alderman, C. Benmore, J. Weber, L. Skinner, A. Tamalonis, S. Sendelbach, A. Hebden , M. Williamson, Corium lavas: structure and properties of molten UO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> under meltdown conditions, *Sci. Rep.* 8 (2018) 2-11..