

早稲田大学大学院 先進理工学研究科

博士論文概要

論文題目

MPS法の改良とVULCANO VF-U1実験の解析によるMCCIの理解の深化

Deepening Understanding of MCCI through Development of MPS
Method and Analysis of VULCANO VF-U1 Experiment

申請者

福田 貴斉
Takanari FUKUDA

共同原子力専攻 原子炉物理学特殊研究

2022年12月

本研究では、原子炉過酷事故時に起こり得る溶融炉心・コンクリート相互作用（MCCI）を模擬した VULCANO VF-U1 実験後のデブリ中において金属成分がコンクリート底部から側壁に沿って分布していた理由を Moving Particle Semi-implicit（MPS）法の改良と解析により示すことで明らかにし、MCCI の現象理解を深めることを目的とした。新界面張力モデル（CFP モデル）の開発と混合モデルの追加考慮を通して改良した MPS 法の解析の結果、同実験のデブリ成分の分布は、実験の中盤以降に炉心燃料物質を模擬した酸化物成分が半溶融／凝固状態になった後もコンクリートの溶融浸食と金属成分の流動が継続していた結果もたらされたことを示した。

第 1 章では本研究の背景、必要性と目的を述べる。原子力エネルギーの持続可能な利用のためには、軽水炉過酷事故時の現象理解の深化が必要である。特に、溶融炉心が原子炉圧力容器から格納容器コンクリート床上に放出された場合に生じる MCCI に係る現象理解は、放射性物質の閉じ込めと環境への放出挙動の評価及び対策の観点から重要である。MCCI は炉心酸化物・金属、床コンクリート等の多成分が、それぞれ異なる温度域で熱分解・溶融・凝固するため、気・液・固の相変化とそれらの間の複雑な多成分多相界面が形成される伝熱流動現象である。しかし従来は、実験や数値解析能力の制約からそのような多成分多相界面の形成は考慮できず、限られた経験則を多用してガス発生やコンクリート侵食の挙動を評価することに留まっていた。MCCI の評価の信頼性を向上するには、機構論的な数値解析により現象の理解を深める必要がある。

従来の実験と異なり、実機事故と同様に炉心金属物質に近い高密度の模擬酸化物燃料 ($\text{UO}_2\text{-ZrO}_2$) を用いた MCCI 実験（VULCANO VF-U1 実験）では、実験後のデブリ中の酸化物成分と金属成分は単純に密度差で成層化せず、密度が最も高い金属成分がコンクリート底部から側壁に沿って分布した。先行する数値解析研究では、コンクリート熱分解により発生する気泡やそれによる溶融物の対流が影響した可能性が指摘されているが、同研究では実験開始後 10 秒間しか解析していない上、固液相変化が考慮できていない。実験後のデブリ成分の分布は MCCI の多成分多相伝熱流動履歴の結果であるため、個々の影響因子と酸化物・金属・コンクリートの異なる温度域における溶融・流動・凝固の相互作用、さらにそれらの結果もたらされる多成分多相界面を伴う伝熱流動履歴とを包括的に考慮する解析により同実験後のデブリ成分のような分布に至った履歴を示せば、MCCI の現象理解を深められる。離散点が流れと共に移動する Lagrange 式記述の Moving Particle Semi-implicit（MPS）法は、界面を明示的に解かず伝熱や固液相変化を伴う多成分間界面を容易に追跡できるため、そのような解析に適しているが、上記のような MCCI 解析のためには溶融物の凝固直前までの固-液及び液-液界面を正確且つ容易に実用的な解析コストで追跡することが課題である。

以上を背景に、本研究は MPS 法の改良と解析により VULCANO VF-U1 実験の溶融金属成分がコンクリート側壁に沿って分布し、凝固するまでの固液相変化を伴う伝熱流動現象の履歴を示し、MCCI の現象の理解を深化することを目的とした。

第 2 章では MPS 法の既存手法を組み合わせた解析により溶融金属成分がコンクリート底部から側壁に沿って分布し、凝固するまでの伝熱流動現象の履歴を示すために、必要な物理現象モデルとその精緻化のレベルを検討した。まず、溶融物が凝固により流動が停止する直前までの固-液及び液-液界面を正確に追跡するために、非圧縮性よりも粘性による速度拡散精度を優先したアルゴリズムを採用した。このとき、非圧縮性が厳密に保証されないことで計算点（粒子）の分布が不均一になり数値

安定性が低下するのを防ぐため、粒子分布の均一性を回復する **Particle Shifting** 法を用いた。また、複雑な液-液界面を簡便に低コストで解析するために、界面形状は求めずに粒子間引力が異成分溶融物間では異なることを利用した界面張力モデル（ポテンシャルモデル）を用いた。このような三次元 **MCCI** 解析により、以下のような解析結果と現象の理解を深めるための課題を得た：

先ず、誘導加熱により炉心燃料物質を模擬した酸化物と金属が溶融すると、溶融金属成分は溶融酸化物成分との密度差によりコンクリート底部に沈降した。次に、コンクリートの溶融が開始し、低密度の溶融コンクリートが溶融物中を上昇し始めると、溶融金属成分もその上昇流に随伴する様子が見られた。この際、暫定的に定めた溶融酸化物成分との間の界面張力を小さくすると、溶融金属成分は分散して広がった。その後、誘導加熱の出力が低下してコンクリート壁近傍の溶融酸化物成分の凝固とコンクリート壁の溶融が同時に進行するようになると、溶融金属成分がコンクリート底部から側壁に沿って分布するようになり、そのまま金属成分が凝固して実験結果と同様な分布が再現された。これらの結果から、**MCCI** の現象理解を深めるにはコンクリート底部から側壁に沿って分布する溶融金属成分周囲のコンクリート壁の溶融、溶融酸化物成分の凝固、異成分溶融物間及び溶融物-凝固物間の密度差に起因する浮力や流れ、これらの影響を受ける固-液及び液-液界面の正確な追跡が重要であると考えた。そして、以下の解析モデルの精緻化が課題と考えた：

- 凝固酸化物成分とコンクリート壁間に形成するミリメートルスケールの液-液、固-液界面の計算能力の向上。
- 浮力や流れに影響を及ぼす、溶融物間の混合に伴う密度や固液相線温度の変化の考慮。

第 3 章では、**第 2 章**で示した課題を解決するために新たに開発した界面張力モデルと追加考慮した溶融物間の混合モデルについてまとめる。**MCCI** の履歴とその後に残留したデブリ中の成分分布の関係を論じるには、溶融物が凝固する直前までの流動と複雑に形成される固液界面を正確に計算できる必要がある。そのためには、以下の条件を満たす実用的な界面張力モデルが必要である：

- 界面形状を明示的に求める必要がない
- モデル中のパラメーターを恣意的に調節する必要がない
- 壁面の濡れ性を考慮できる
- 低密度液相中の高密度液滴の自重沈降等の解析に求められる基本的な数値計算能力を有する

一般的な界面張力モデルは界面形状を明示的に求める必要がある上に壁面の濡れ性が考慮できないため、**MCCI** 解析には適さない。従来の **MPS** 法のポテンシャルモデルは全ての粒子間に引力を作用させ、異成分粒子間の引力の差を利用して界面形状を求めずに界面張力や壁面の濡れ性を模擬できる。しかし、粒子が不自然に凝集し、圧力が過大評価されたり流動が阻害されたりする問題や、界面張力を恣意的に決める必要があった。そこで、異成分粒子間にのみ斥力を作用させ、新たな界面形成に伴う仕事量から界面張力を導出する新界面張力モデル (**Cohesion-Free Potential (CFP)** モデル) とその濡れモデルを開発した。そして、その妥当性を、液体中の異成分液滴沈降挙動、**Laplace** 圧力の評価、剪断流中の液滴変形、接触角の評価等により検証した。このような実用的な **CFP** モデルにより、**MCCI** の履歴がデブリ成分の分布に及ぼす影響を論じることができるようになった。

また溶融コンクリート成分と炉心酸化物成分の混合に伴う密度や固液相線温度の変化を考慮するため、両者の粒子に仮想的にコンクリート成分濃度を与え、**MPS** 法の拡散モデルで粒子間を拡散さ

せた。ただし、粒子径以下のスケールの対流や気泡上昇による溶融物の対流に伴う拡散の促進の影響は考慮できないため、拡散係数を感度解析変数とした。また、固液相線温度にはコンクリート成分濃度に応じた実験データを用いた。

第4章では、第3章で開発・追加考慮した界面張力モデルと混合モデルを統合した改良 MPS 法を用いて VULCANO VF-U1 実験の二次元解析を従来よりも高解像度で（粒子径を 7.5 mm から 2.0 mm に低減して）実施し、同実験の溶融金属成分がコンクリート側壁に沿って凝固するまでの伝熱流動現象の履歴の現象理解を以下のように深めた：

誘導加熱出力が高い初期には、第2章に示した結果と同様に、溶融金属成分はコンクリート底部に沈降した。その後、誘導加熱の出力が低下し、コンクリート底部から側壁の近傍の酸化物成分が内側の溶融酸化物成分を覆うように凝固してクラスト層を形成し始めた。この状態でも、コンクリート底部の溶融浸食とそれに伴う溶融・凝固物全体の沈降は継続した。その結果、底部に沈積していた溶融金属成分は酸化物クラスト層とコンクリート側壁の間の流路に押し出されるように分布した。その後、溶融金属成分はコンクリート側壁付近の上部から凝固し、コンクリートの下方浸食から取り残されて軸方向に引き伸ばされるように分布した。一方、酸化物成分の固液相線温度を仮想的に低減して、酸化物成分が金属成分と同時期に凝固するようにした感度解析ではそのような分布に至らず、酸化物層の下に金属層が密度成層化した。これらの解析結果から、VULCANO VF-U1 実験後に残ったデブリ中において金属成分がコンクリート側壁に沿って分布した理由を次のように理解できた。すなわち、酸化物成分が冷えて半溶融／凝固状態となり、流動性が失われた後もコンクリートの下方への浸食が継続した結果、半溶融／凝固状態の酸化物層の沈降から押しのけられるように溶融金属成分がコンクリート側壁に沿って分布し、その後上部から凝固した結果もたらされたと理解できた。

第5章では本研究の結論と今後の課題・展望を示す。本研究では、VULCANO VF-U1 実験後のデブリ中において金属成分がコンクリート側壁に沿って分布していた理由を MPS 法の改良と MCCI 解析により示した。そのためには、MCCI に伴う液-液及び固-液界面の計算能力の向上が必要と考え、複雑な多成分間の界面張力を容易且つ安定的に考慮できる CFP モデルを開発した。また、溶融物間の混合に伴う密度や固液相線温度の変化の履歴を拡散理論に基づく混合モデルにより考慮した。そして、これらを統合した改良 MPS 法により解析を実施した。その結果、同実験のデブリ成分の分布は、酸化物成分が冷えて半溶融／凝固状態になった後もコンクリートの溶融浸食と金属成分の流動が継続していた結果もたらされたことを示した。以上により、従来はコンクリート熱分解等に伴うガス発生履歴や、コンクリート侵食進展を示す熱電対温度履歴等から深められてきた MCCI の理解に対して、新たに MCCI 実験後に残留したデブリの成分分布を手掛かりに、溶融物が凝固する過程における MCCI の理解を深める手法を確立した。ただし、コンクリートの化学反応や熱分解及びそれに伴い溶融物中に生じる気泡がコンクリート浸食に及ぼす影響等の考慮は今後の課題である。

本研究では従来の典型的な MCCI 実験や数値流体解析で想定されていた条件に比べてコリウムの崩壊熱と温度が大きく低下した後の MCCI の理解を深めることができた。このような理解は例えば、原子炉停止後相当程度の時間が経過して崩壊熱が低下した後に生じる MCCI や、福島第一原子力発電所（1F）の事故のように燃料デブリの不十分な冷却が長期間継続する場合を想定した安全研究の発展を支える基盤研究として貢献することが期待される。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名： 福田 貴齊 印

(2022年 11月 現在)

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	<p>○ Takanari Fukuda, Xin Li and Akifumi Yamaji "A new potential interface tension model for MPS method avoiding unphysical particle cohesion", Progress in Nuclear Energy vol. 150, 104311, 2022</p> <p>○ Takanari Fukuda, Akifumi Yamaji, Xin Li, Jean-François Haquet and Anne Boulin, "Analysis of the localized metallic phase solidification in VULCANO VF-U1 with MPS method," Nuclear Engineering and Design, vol. 385, No. 111537, 2021</p>
講演	<p>○ Takanari Fukuda, Xin Li and Akifumi Yamaji, "Development of a New Wall Wetting Model for Cohesion-Free Potential Interface Tension Model of MPS Method", Proceeding in The 12th Japan-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS12), N12P1101, Miyazaki, Japan, October 30 - November 2, 2022</p> <p>福田貴齊, 山路哲史, 武井遥来, 山下晋, 吉田啓之" MPS法に基づいたMCCIにおける多相多成分伝熱流動解析手法の開発", 日本原子力学会2022年秋の大会, 2022/9/7-9, 茨城</p> <p>○ Takanari Fukuda, Akifumi Yamaji and Xin Li, "Development of an Interface Tension Model of MPS Method to Avoid Particle Clumping of Inner-Particles", 15th World Congress on Computational Mechanics & 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (WCCM-APCOM2022), 2022/7/31-2022/8/5, (オンライン)</p> <p>福田貴齊, 山路哲史, Li Xin "Multi-Physicsモデリングによる福島2・3号機ベデスタル燃料デブリ深さ方向の性状同定 (15) VULCANO VF-U1実験のMPS法による解析から考えられるデブリの局所性状", 日本原子力学会2022年春の年会, 2022/3/16-18 (オンライン)</p> <p>福田貴齊, 山路哲史, Li Xin "VULCANO VF-U1実験における金属相凝固分布メカニズムのMPS法による解明", 原子力学会熱流動部会若手研究者勉強会 ポスターセッション 2021/11/19 (オンライン)</p> <p>○ Takanari Fukuda, Akifumi Yamaji, Xin Li, Jean-François Haquet and Anne Boulin, "Development of MPS Method for Analyzing Convection and Solidification of Multi-Component Corium in Severe Accident of a Light Water Reactor", Proceedings of the VII International Conference on Particle-Based Methods (PARTICLES 2021), 2021/10/4-6 (オンライン)</p> <p>福田貴齊, 山路哲史, Li Xin "VULCANO VF-U1実験における金属コリウム局所凝固挙動のMPS法解析の改良", 日本原子力学会2021年秋の大会, 2021/9/10 (オンライン)</p> <p>福田貴齊, 山路哲史, Li Xin "VULCANO VF-U1実験における金属コリウム局所凝固挙動のMPS法による解析", 日本原子力学会2021年春の年会, 2021/3/17-19 (オンライン)</p> <p>福田貴齊, 山路哲史, Li Xin "VULCANO VF-U1実験における金属コリウム局所凝固挙動のMPS法による解析", 日本原子力学会学生ポスターセッション, 2021/3/17-18 (オンライン)</p> <p>福田貴齊, 山路哲史, Li Xin "MCCIにおける模擬コリウム中の金属相局所凝固メカニズムのMPS法による解明", 第6回次世代イニシアティブ廃炉技術カンファレンス (NDEC-6), 2021/3/3 (オンライン)</p> <p>福田貴齊, 山路哲史, Li Xin "MCCIにおける金属コリウム凝固挙動のMPS法による予備解析", 日本原子力学会2020年秋の大会, 2020/9/16-18 (オンライン)</p>