

# 博士(工学)論文 要約版

Aerosol transportation phenomena by pool scrubbing  
(プールスクラビングにおけるエアロゾルの輸送現象)

Graduate School of Systems and Information Engineering  
University of Tsukuba

March 2022

Fujiwara Kota

# 第1章 緒言

初の商用原子炉が実用化された 1950 年代より、原子力発電所におけるシビアアクシデント (SA) のリスクアセスメントを実現すべく、多くの試みが多くなされてきた<sup>[1]</sup>。特にスリーマイル島原子力発電所の二号機で生じた SA 以降、SA 時の過渡的事象を解明すべく多くの研究がなされた。それらは 1991 に NUREG-1150<sup>[2]</sup>において記載された確率的リスク評価 (PRA) という形で今日に至るまで原子力発電所におけるリスクアセスメントの基礎となっている。しかしながら、2011 年に発生した福島第一原子力発電所の事故以降、原子力発電所の規制基準の見直しが進められており、その根拠として用いられる SA 解析コードについてもソースターム評価の観点から高度化が求められている。

ソースタームとは、事故時に炉内で生じる核分裂生成物質 (FP) の量や放出時間、組成といったパラメータの総称である。これらのパラメータは、事故時に放出される FP を評価するうえで極めて重要である一方で、炉内で SA 時に生じる熱水力事象と密接に関連しており、解析を行う上で不確かさが大きいとされている。本研究では、SA 時に想定される様々な事象のうち、特にエアロゾルの形態をとる FP の輸送に大きく寄与するとされる**プールスクラビング**に着目した。Fig. 1 に既存のモデルで想定されるプールスクラビングにおけるエアロゾル輸送現象<sup>[3]</sup>を示す。プールスクラビングとは、エアロゾルが水中に放出されることで気泡流を生成し、気相から液相への物質輸送が生じることで除染される効果を指す。プールスクラビングは、軽水炉では、BWR におけるサプレッションチャンバーのベント管を通じたウェットベント<sup>[4]</sup>、PWR の蒸気発生器伝熱管破損事故<sup>[5]</sup>、また近年では、SA 軽減策として多くの国で設置が進められるフィルタードベントシステム<sup>[6]</sup>などにおいて想定されている。MELCOR<sup>[7]</sup>や MAAP4<sup>[8]</sup>といった既存の総合 SA 解析コードでは、SPARC'90<sup>[9]</sup>、BUSCA<sup>[10]</sup>、SUPRA<sup>[11]</sup>など、様々なモデルを用いてプールスクラビングの解析がなされてきた。これらのモデルは細かな構成式が異なるものの、水中に放出されたエアロゾルが形成した気泡流を構成する個々の気泡から生じるエアロゾル輸送量を積分することで、にエアロゾルの除染性能を評価をしている。

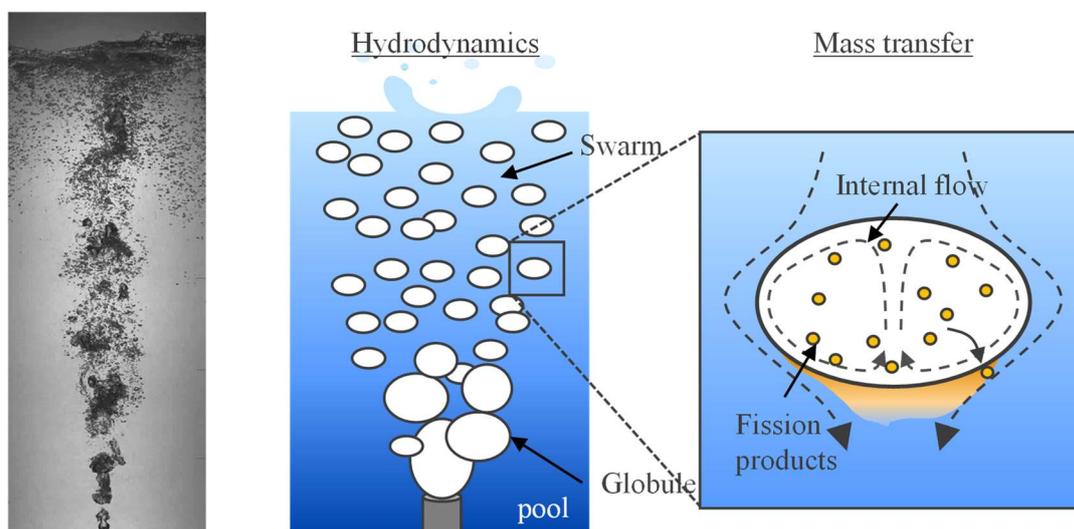


Fig. 1: 既存のプールスクラビングモデルで想定されるエアロゾル輸送現象

本モデルの妥当性を検証するため、大小様々なスケール、パラメータにおいて、エアロゾルの輸送性能評価が数多くなされてきた<sup>[12], [13], [14], [15]</sup>。これらの既存研究から、既存のモデルの課題が多く見つけてきたものの、それらの課題の多くはモデルに反映し、SA 解析の不確かさを低減するには至っていない。その理由として、プールスクラビングによるエアロゾルの除染性能に寄与するパラメータは特定できていないものの、気液二相流からのエアロゾルが輸送される際のメカニズムが不明であるため、それらのパラメータがエアロゾル輸送に与える影響を機構的に説明することができなかったことが挙げられる。特に、気液二相流動については既存知見が存在す

るものの、固気液三相流における物質輸送を機構論的に取り扱った研究は非常に少なく、単一の気泡におけるエアロゾル輸送現象といった基礎的な知見すらないのが現状である。

以上を踏まえ、本研究は単一気泡におけるエアロゾル輸送現象を解明することを通じて固気液三相流における物質輸送の支配要因を同定し、その情報をもとにプールスクラビングにおけるエアロゾル輸送性能を評価するモデルを開発することを目的とする。これを実現するため、本研究においてはまず気泡内や界面における流動現象を調査することで既存モデルの想定と、実現現象の乖離要因について議論する。加えて、それらのパラメータが実際にエアロゾル輸送にどのように寄与するかを明らかにするため、単一気泡におけるエアロゾル輸送性能や、気泡周囲のエアロゾル濃度場を計測する。これらの計測結果をもとに、実験結果では得られない気泡内のエアロゾル運動を機構論的に説明するため、固気液三相流の数値解析モデルを構築する。更に、構築した数値解析モデルを用いて気泡内の流動場やエアロゾル物質輸送現象を一般化し、既存のモデルと実現現象の乖離要因を反映した単一気泡におけるエアロゾル輸送モデルを開発する。最後に、実条件で想定される気泡流を用いて、単一気泡で生じる物質輸送量を流動全体で積分するモデルを提案し、実験から得られた除染性能と解析結果を比較することで、本研究結果のプールスクラビングモデルへの適用可能性について議論する。

## 第2章 気泡内流動評価実験

本章では、気泡における物質輸送現象を評価する要素として、エアロゾルの駆動力である気泡内流動場ならびに表面積の指標となる気泡形状についての評価を行った。MELCOR で使用される既存のプールスクラビングモデルでは、気泡内の流れに対して等ポテンシャル流れを前提としたトロイダル渦構造と想定しているものの、実現現象については明らかでない。実現現象が想定と大きく異なる場合、エアロゾルの運動に大きく影響するため、直接計測することとした。しかしながら、気液界面の屈折率差により、気泡そのものを用いて内部を可視化することはできない。そこで、本研究では気泡の模擬流体として水と屈折率の近い液滴を用いて内部流動の評価を行った。

模擬流体を選定するため、Clift et al., (1978)<sup>[6]</sup>によって示された気泡運動の Regime map より、気泡とよく変形挙動が類似する 0.65 cs のシリコンオイルを用いて内部流動の可視化を行った。実際に液滴の中にトレーサ粒子を混入し、レーザーによって蛍光粒子を励起させた可視化画像を Fig. 2 (a) に示す。画像より、気泡では可視化できない内部の詳細な情報が可視化されていることがわかる。さらに、可視化データに対して粒子画像流速計 (PIV) および画像の重ね合わせによる流跡線を取得した結果を、それぞれ Fig. 2 (b) および Fig. 2 (c) に示す。計測結果より、油滴の上部で既存のモデルが前提とするトロイダル渦構造が生じている一方で、油滴の下部においては油滴の界面変形に伴う過渡的な流動が生じていることを発見した。計測結果より、内部流動が既存モデルの想定と異なることを発見した。

加えて、気泡の内部に粒子を混入し、Bian et al., (2013)<sup>[7]</sup>の手法を用いて気泡の三次元形状を取得し、アスペクト比として評価した結果を Fig. 3 に示す。計測結果より、気泡内に CsI を投入したときのみ MELCOR と一致する傾向がみられた。一方で、OX50 や BaSO<sub>4</sub> を投入した際および気泡内に粒子を投入しない場合においては MELCOR を大きく上回る傾向がみられた。計測結果より、内部流動を評価する際に、界面形状についても既存モデルの想定と異なることを示した。

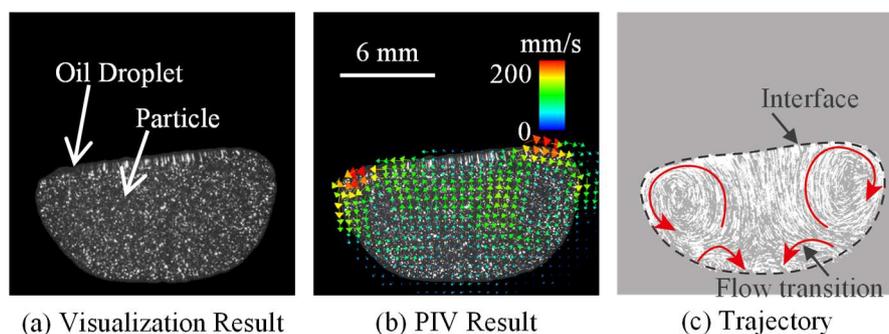


Fig. 2: 模擬流体を用いた内部流動の計測結果

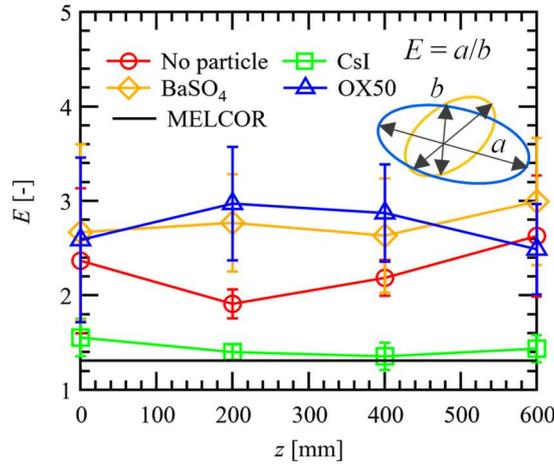


Fig. 3: 気泡内に投入する微粒子の性状が気泡形状に及ぼす影響

### 第3章 除染現象の評価実験

第2章の計測結果を踏まえ、既存モデルと実現象の乖離要因として、内部流動と界面形状という二つのパラメータを同定した。それらの乖離要因が具体的にどのようにエアロゾル輸送に寄与するかを明らかにするため、本章では気泡からエアロゾルが除染される際の現象として、エアロゾルの輸送性能ならびに除染が生じる際の気泡周囲濃度場について計測を実施した。

本研究では、気泡の持つエアロゾル輸送性能を実際に計測するため、気泡を水中に投入した際の初期エアロゾル濃度と、気泡内に水面まで保持されていたエアロゾルの量を計測し、それらの比である除染係数 (DF) を計測することとした。実験に際しては Glycerin ならびに CsI 水溶液からなるエアロゾルを気泡の内部に投入し、初期エアロゾル濃度については気泡を透過する光の輝度計測より、残存エアロゾル濃度については、任意の水位において水面でエアロゾルのサンプリングを行い、その粒径ごとの濃度比を計測することで、エアロゾル輸送性能を評価した。Fig. 4 (a) に 0.2 m – 0.6 m の4条件で各十回ずつ計測したエアロゾルの粒径分布を示す。計測結果より、単一気泡の持つエアロゾル輸送性能については粒径依存性が大きいことを明らかにした。特に 0.8  $\mu\text{m}$  を超える大径粒子については、水中に投入された直後にほぼ全量が除染された。一方で、0.3  $\mu\text{m}$  以下の小径粒子については、1.0 m の水頭を通過してもなお気泡内に多くの粒子が残存していることが示された。Fig. 4 (b) に同一条件において MELCOR モデルで解析されるエアロゾルの残存数を示す。解析結果からは、全ての粒径において MELCOR モデルが実現象よりエアロゾルの輸送性能を大幅に低く見積もっていることが明らかとなった。

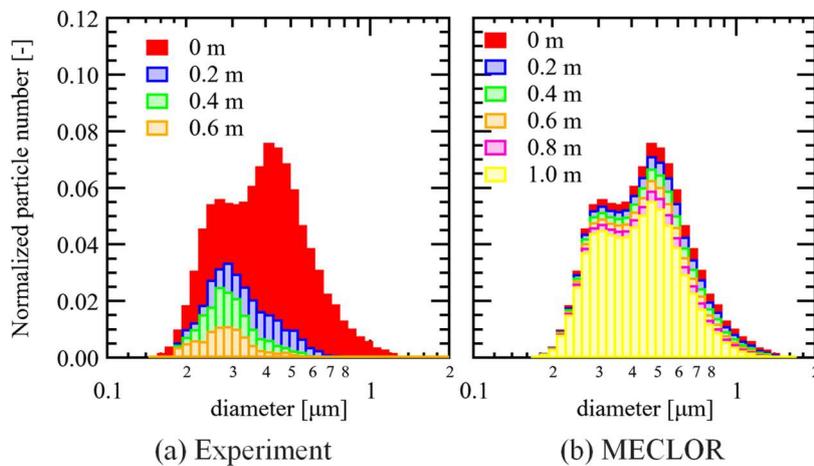


Fig. 4: 各水位における粒子数分布の計測結果

除染性能の計測より、単一気泡のエアロゾル輸送性能についてモデルと実現象の間で乖離が生じることを示したが、実際にエアロゾルがどのように輸送されて、モデルと実現象の乖離に至ったかについては明らかでない。そこで、本研究ではエアロゾルが除染される際の挙動を実験的に取得することを目指し、新たに干渉縞計測を用いた気泡周囲におけるエアロゾル濃度場の計測手法を開発した。計測に際しては M/Z 干渉計を作成し、テストセクション内に水槽を設置した。水槽の下部から干渉計の計測領域にかけてエアロゾルを含む気泡を射出し、気泡周囲より液相中に形成される濃度場に伴う光路差を干渉縞として計測した。Fig. 5 に、気泡周囲においてエアロゾル濃度場を計測した結果を示す。計測結果より、特に気泡の下部においてエアロゾル濃度が高い領域が存在することを示した。加えて、除染に際して気泡周囲の濃度場が非定常に変化している様子を明らかにした。

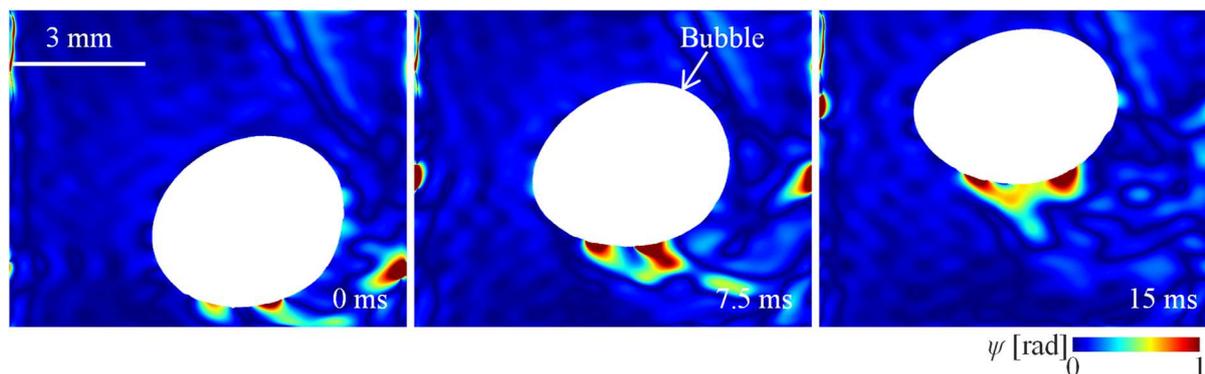


Fig. 5: 気泡周囲におけるエアロゾル濃度の計測結果

## 第4章 エアロゾル物質輸送解析

第3章までの研究結果より単一気泡のエアロゾル輸送性能についてモデルが実現象を大幅に過小評価することを示した。それを受けて、気泡周囲のエアロゾル濃度場の非定常な濃度を計測することには成功したものの、気泡外からの計測だけでは、気泡内のエアロゾルにどのような駆動力が生じて除染に至るかについては明らかでなかった。気泡内のエアロゾルに生じる駆動力を評価し、加えて実験では実現できない広範なパラメータでエアロゾル輸送現象を評価するためには、単一気泡におけるエアロゾルの物質輸送性能を解析する固気液三相流解析コードを新規に開発する必要があると考えた。

本研究では既往研究のレビューから Frederix ら (2016)<sup>[18]</sup>による Eulerian な固気二相流エアロゾル輸送モデルに着目し、本モデルについて、Hayashi and Tomiyama (2011)<sup>[19]</sup>の two-fluid model を適用することで、固気液三相流モデルに拡張できるのではないかと考えた。加えて、本モデルでは気泡の界面形状を高次精度で再現するため、界面追跡法として、Conservative Level-set 法<sup>[20]</sup>を採用した。そこで、固気液三相流モデルを開発する前段階として、気液二相流におけるガス輸送の条件で気泡の持つ物質輸送性能を評価し、既存の実験相関式と比較を行うことで、解析モデルの妥当性評価を行うこととした。開発した固気二相流モデルを Tomiyama ら (1998)の気泡終端速度の相関式<sup>[21]</sup>ならびに既存の Sh 数相関式<sup>[22], [23]</sup>と比較を行ったところ、いずれもシミュレーションと既存の相関式と良好に一致することを示した。

以上を踏まえて、エアロゾルの固気二相流モデルに抗力項を加えることで、数値解析コードを固気液三相流モデルに拡張した。固気二相流モデルを固気液三相流モデルに拡張する際に課題となるのが、気液界面における固相の取り扱いである。既存のガス輸送を対象としたモデルにおいては気泡の界面においてはヘンリーの法則などを用いて気液二相流の液相側からの情報だけで解析を実施するが、エアロゾルにおいてはヘンリーの法則が成立しない。そこで、本研究では Balcázar-Arciniega ら (2019)<sup>[24]</sup>による気液界面における法線方向最近傍要素の探索手法を応用することで、気相側の要素だけを用いる Internal、液相側の要素だけを用いる External、界面の要素を気相側に補間する Interpolation/Extrapolation という、3種類の界面モデルを提案した。それぞれのモデルを用いてエアロゾルの物質輸送解析を実施し、解析結果を実験結果と比較することで、最

適な界面モデルを選択することとした。Fig. 6 (a)では、以上の3つの界面モデルに用いて glycerin 粒子に対して  $d_B = 5 \text{ mm}$  の単一気泡でエアロゾル輸送解析性能を解析し、実験結果と比較した結果を示す。解析結果より、Internal model で実現とモデルが最も良く一致する傾向が得られた。これは、気泡内部のエアロゾルは気泡内部の流動にのみ影響を受けているという実現を反映していると考えられる。また、Fig. 6 (b)では Internal model を用いて glycerin, CsI 粒子の二条件で解析を実施し、MELCOR や実験結果と比較した結果を示す。解析結果より、MELCOR では実験で得られた粒径分布を大きく過小評価するのに対して、本研究で開発した数値解析コードはいずれの粒子条件でも実験とよい一致を示した。

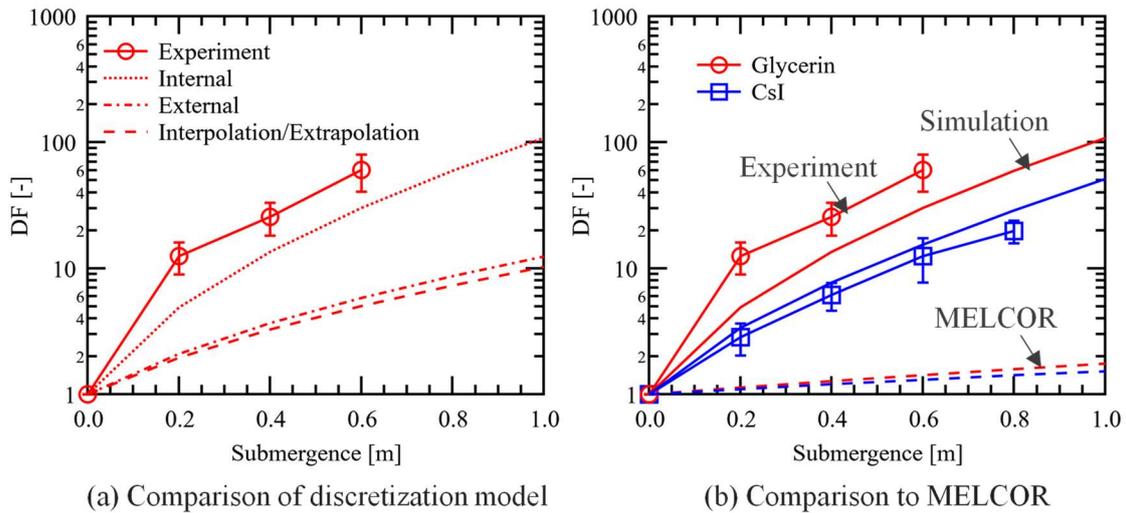


Fig. 6: 解析結果と、実験、MELCOR 解析結果の比較

## 第5章 単一気泡における除染現象評価

本章では第4章までで開発した数値解析モデルを用いて、気泡流を構成する広範な気泡径でエアロゾル輸送現象を解明する。本章でははじめに  $d_B = 1.0 \text{ mm} - 12.0 \text{ mm}$  にかけての10条件の気泡形状に対してシミュレーションを実施し、気泡径が物質輸送係数の慣性項  $k_{d, inertia}$  に与える影響を解析した。解析結果と MELCOR における物質輸送係数の慣性項をプロットした結果を Fig. 7 (a) に示す。一点鎖線で示される MELCOR の解析結果と、プロットで示されるシミュレーションの結果を比較すると、MELCOR 解析の結果が全気泡径、粒径の範囲でシミュレーションを下回る傾向がみられた。加えて、シミュレーション結果はエアロゾル粒径と気泡径の両方に対して強い相関がみられる一方で、MELCOR 解析もエアロゾル粒径に対しては相関がみられた一方で、気泡径については強い相関がみられなかった。第2章で示したように、モデルと実現の乖離要因として、内部流動と気泡形状の二つが挙げられる。Fig. 7 (b) にシミュレーションから得られた気泡アスペクト比と、MELCOR 解析によるアスペクト比を比較した結果を示す。解析結果はモデルを全体的に大きく上回る傾向が得られた。この気泡形状の差異が物質輸送に与える影響を調べるため、シミュレーション結果より得られたアスペクト比を、Re 数と Eo 数の関数として以下のように定式化した：

$$\begin{aligned}
 E &= \{1 + 0.016(Eo^{1.12}Re)\}^{0.388} \text{ for } Eo \leq 0 \\
 E &= \{1 + 1.59391/Eo\}^{Eo} \text{ for } 1.0 < Eo \leq 5.0 \\
 E &= 3.98 \text{ for } Eo > 5.0
 \end{aligned} \tag{1}$$

加えて、定式化したモデルを用いて MELCOR モデルで想定される気泡の物質輸送係数について、アスペクト比が関係する界面速度  $v_s$ 、地心緯度  $\beta$  および表面積  $A$  を補正し、以下のように改良 MELCOR モデルを定義した：

$$k_{d,inertia} = \frac{v_{g,i}}{g} \left( \frac{v_s^2(\mathbf{a}, \mathbf{b})}{\gamma_c} \right) - v_{g,i} \cos \beta(E)$$

$$DF_{BB,i} = \exp \left( \frac{\Delta t}{V_B} \int_{A(\mathbf{a}, \mathbf{b})} (k_{d,inertia} + v_{D,i}) dA(\mathbf{a}, \mathbf{b}) \right). \quad (2)$$

改良 MELCOR モデルによる解析結果を、Fig. 7 (b)の点線で示す。解析結果について、 $E_o > 10$  においては改良モデルとシミュレーション結果が良好に一致した一方で、 $E_o < 10$  については依然シミュレーション結果がモデルを大幅に下回る傾向が得られた。

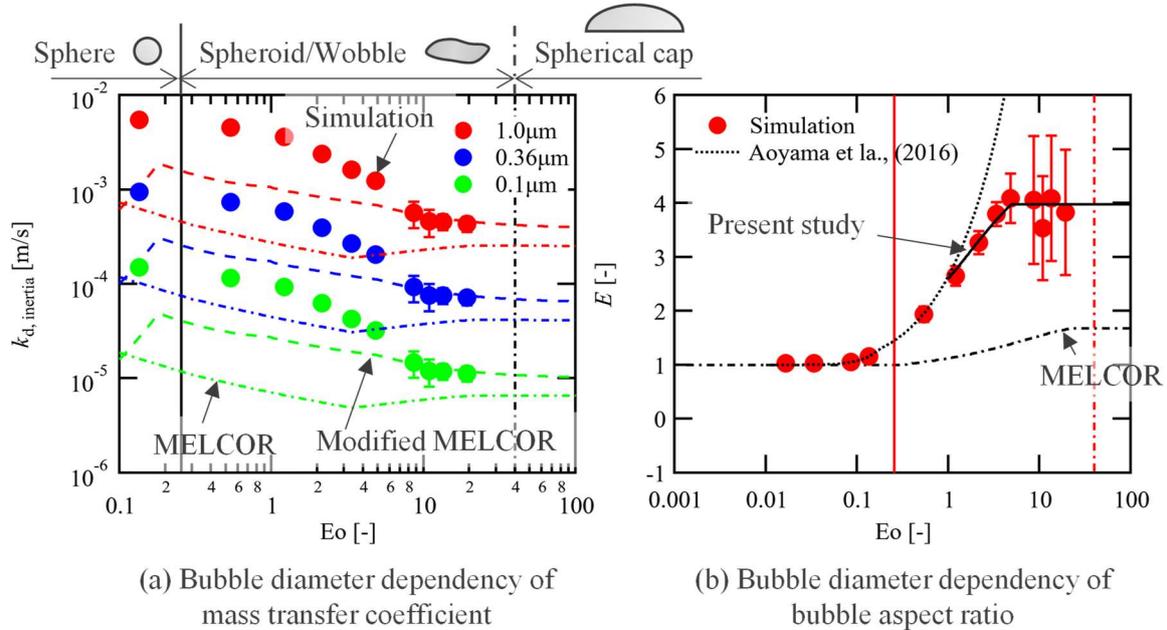
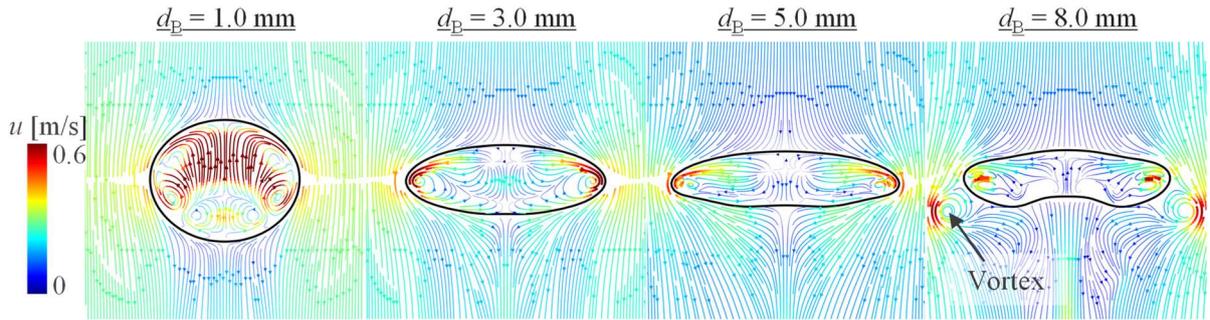


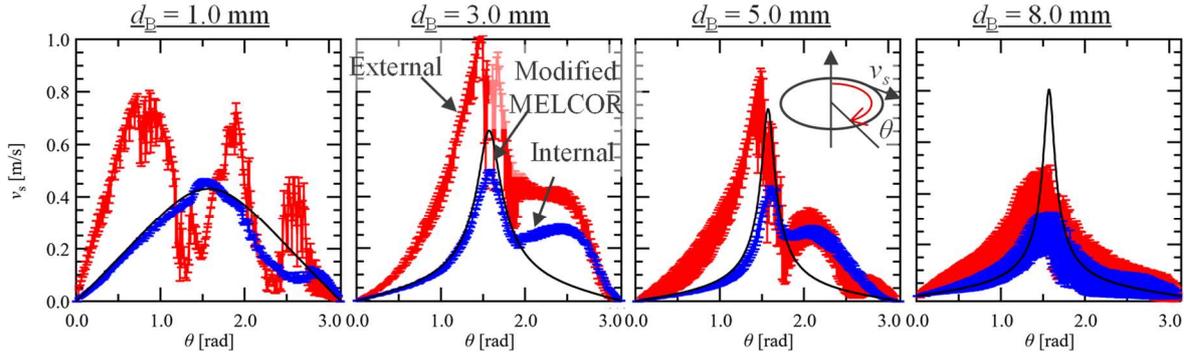
Fig. 7: 気泡径が物質輸送係数の慣性項に与える影響の評価

以上の結果を踏まえて、モデルと実現象のもう一つの乖離要因である内部流動場に着目し、代表的な気泡径に対して、気泡中心断面における内部流動場の流跡線をプロットした結果を Fig. 8 (a)に示す。解析結果より、小気泡においては MELCOR が想定するトロイダル渦構造が確認できた一方で、気泡径が増大するとともに渦構造がみられなくなり、最終的には気泡端部から渦が放出されることで、気泡変形が支配的となる様子が確認された。続いて、Fig. 8 (b)では気泡界面における接線方向流速に着目し、気泡内気相側の速度、液相側の速度を Eq. (2)に示す改良 MELCOR モデルで定義した界面速度と比較した。解析結果は、小気泡では 5.0 mm より小さい気泡では気泡外部で改良 MELCOR とよい一致を示した一方で、気泡内部は気泡径が小さくなるにしたがって速度はより大きく、 $d_B = 1.0$  mm に至っては定性的にも大きく異なる速度場が得られた。この速度場の差が、Fig. 7 (a)で改良 MELCOR モデルがシミュレーション結果を過小評価した原因と考えられる。また、界面変形が卓越する  $d_B = 8.0$  mm においては気泡変形によって、改良 MELCOR をシミュレーションにおける気泡長辺付近の速度場が下回る傾向が得られた。最後に、気泡界面における局所物質輸送係数のシミュレーション結果を MELCOR や改良 MELCOR モデルと比較した結果を Fig. 8 (c)に示す。 $d_B = 1.0$  mm のシミュレーション結果ではいずれのモデルとも異なり、気泡全体から物質輸送が生じる傾向が確認された。 $d_B = 3.0, 5.0$  mm では、改良 MELCOR モデルと解析結果が良好に一致した。最後に、 $d_B = 8.0$  mm では気泡の長辺では MELCOR を下回ったものの、気泡下部では揺動により、MELCOR を上回る物質輸送がみられた。これにより、 $E_o > 10$  ではシミュレーションと改良 MELCOR モデルが良好に一致したと考えられる。

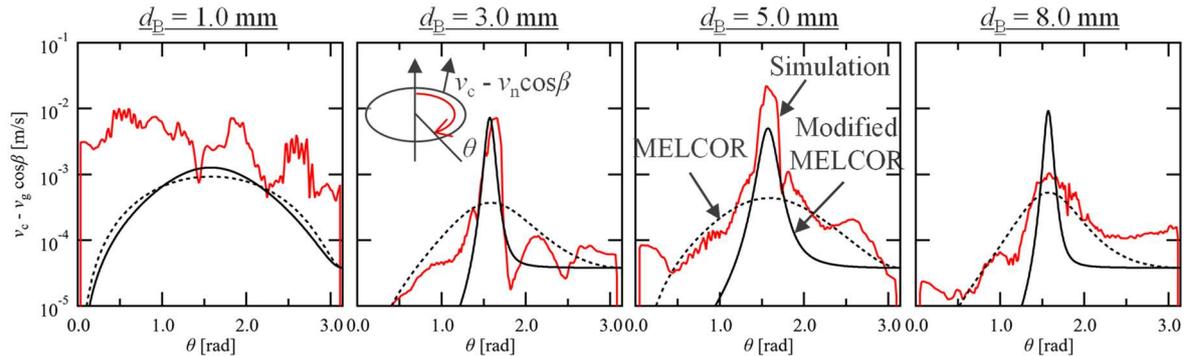
以上を踏まえて、気泡形状を考慮してもなおシミュレーション結果を過小評価する原因として、気泡内流動場と局所物質輸送係数の比較を通じて、気泡内外における流動の不連続性、および界面揺動により、単一気泡でエアロゾル輸送の促進や抑制が行われるメカニズムを解明した。



(a) Trajectory inside and outside bubble



(b) Local interfacial velocity distribution



(c) Inertial term of local mass transfer coefficient distribution

Fig. 8: 気泡界面における局所解析値と、MELCOR モデルの比較

## 第6章 エアロゾル除染性能モデルの開発

最後に、本章では単一気泡のエアロゾル輸送効果を気泡流全体で積分するプールのクラビングコードを開発し、実験から得られた DF と一致するかについての評価する。そのために、気泡流の中に存在する個々の単一気泡の情報が必要であるため、上昇自由噴流の条件で、気泡径分布をモデリングする必要がある。そこで、まずは気泡流を構成する個々の気泡の直径分布を測定し、同条件で気泡流の DF を計測することで、検証の前提となるレファレンスデータを取得した。実験より得られた DF と MELCOR 解析結果を比較することで、MELCOR は気泡流においても実際の DF を過小評価することが分かった。MELCOR の DF 解析においては DF を増大させる因子として、気泡の総表面積と、気泡当たりの物質輸送性能が挙げられる。このうち、気泡の相表面積についてはこれまでの研究でむしろ実現現象を過大評価していることが明らかとなっており<sup>[25]</sup>、気泡当たりの物質輸送性能の評価に DF の過小評価の原因があると考えられる。そこで、第 5 章までの研究結果を踏まえ、Fig. 7 (a) で示した物質輸送係数の慣性成分の過小評価を考慮したモデルを開発することにした。第 5 章で提案した改良 MELCOR モデルは  $Eo > 10$  の領域でシミュレーション結果と良好に一致することは既に示したとおりである。一方で、 $Eo < 10$  におけるシミュレーション結果の過小評価は気泡内の流動遷移による非線形なものであるため、ポテンシャル流

れを前提とする MELCOR を単純に拡張しただけでは考慮することができない。そこで、本研究では新たに  $0.25 < Eo < 10$ ,  $1.0 \times 10^{-7} < Stk < 1.0 \times 10^{-3}$  の条件で数値解析を実施し、気泡の  $Eo$  数とエアロゾルの  $Stk$  数をもとに、物質輸送係数を以下のように定式化した:

$$\begin{aligned}
 k_{d,inertia} &= \exp(a \ln^2(Stk) + b \ln(Stk) + c) \\
 a &= 2.19 \times 10^{-3} \ln^2(Eo) - 7.46 \times 10^{-3} \ln(Eo) + 2.38 \times 10^{-2} \\
 b &= 5.38 \times 10^{-2} \ln^2(Eo) - 0.162 \ln(Eo) + 1.27 \\
 c &= 1.96/(Eo + 0.454) + 1.65.
 \end{aligned} \tag{3}$$

定式化した物質輸送係数を用いることで、気泡の  $Eo$  数ごとに物質輸送係数を以下のように定義した:

$$\begin{aligned}
 k_{d,inertia} &= \exp(a \ln^2(Stk) + b \ln(Stk) + c) \quad (0.25 < Eo < 10). \\
 k_{d,inertia} &= v_c - v_g \cos \beta \quad (Eo \geq 10).
 \end{aligned} \tag{4}$$

以上の物質輸送係数に拡散項を加え、Eq. (1)に示す気泡形状を用いて気泡界面で積分することで、気泡径ごとの DF を以下のように定義した:

$$DF_{local,d_B,dp} = \exp\left(\frac{\Delta t}{V_B} \int_{A(a,b)} (k_{d,inertia} + v_{d,i}) dA(a,b)\right). \tag{5}$$

最後に、これらの気泡径ごとの物質輸送係数を気泡流条件で評価できるように、Fig. 9 に示すような流動を構成する全ての気泡径に対するエアロゾル輸送を考慮したモデルを開発した。本モデルではまず水深方向に領域を分割し、あらかじめワイヤメッシュセンサーを用いて各水深における気泡径分布をモデル化した。そのうえで、それぞれの区間における気泡径分布に対応する DF を適用することで、各水深におけるエアロゾル輸送を評価した。ベント間出口直後で計測されたエアロゾルの総質量濃度と水面までに残存したエアロゾルの総質量濃度の比を取ることで、流動全体の DF を算出した。

本章で開発したコードを用いて DF 解析を実施し、同条件での実験結果ならびに MELCOR モデルの解析結果を比較した結果を Fig. 10 (a)に示す。MELCOR モデルが全体的にエアロゾル輸送を過小評価しているのに対して、本研究が開発したモデルでは気泡内におけるエアロゾルの非線形な流動を考慮したことで、過小評価の傾向を解消したことが分かる。特に、Fig. 10 (b)からわかるように、気泡流が発達する高水位においては今回開発したプールのスクラビングモデルが実験結果を良好に再現することを示した。以上より、MELCOR が DF を過小評価している原因を、気泡からの物質輸送の過小評価として説明できることを示した。

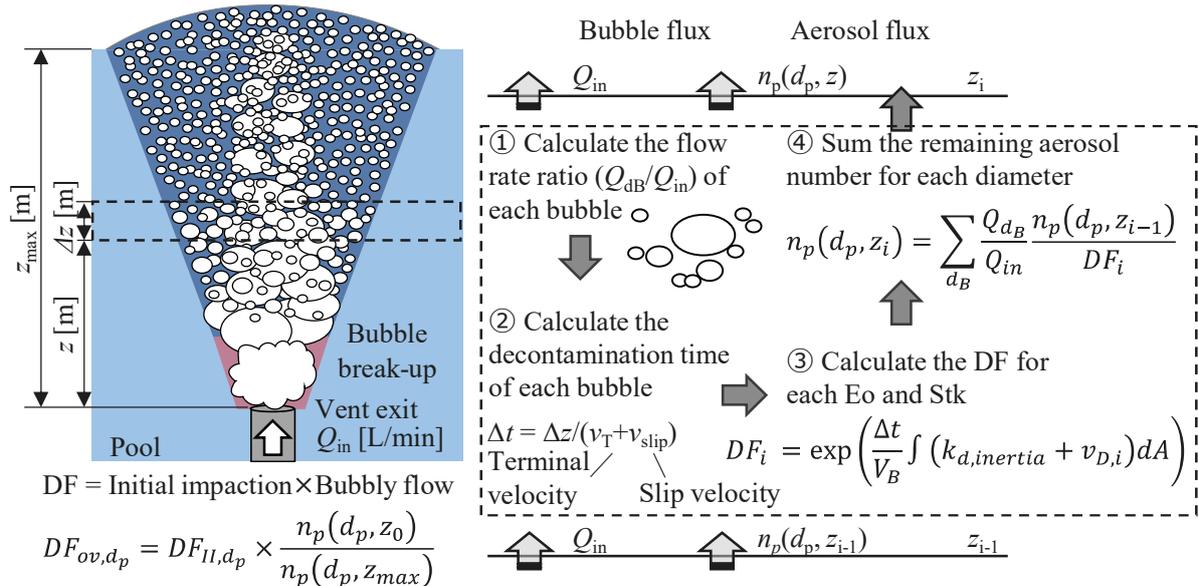


Fig. 9: 本研究で構築したプールのスクラビングモデルの概要

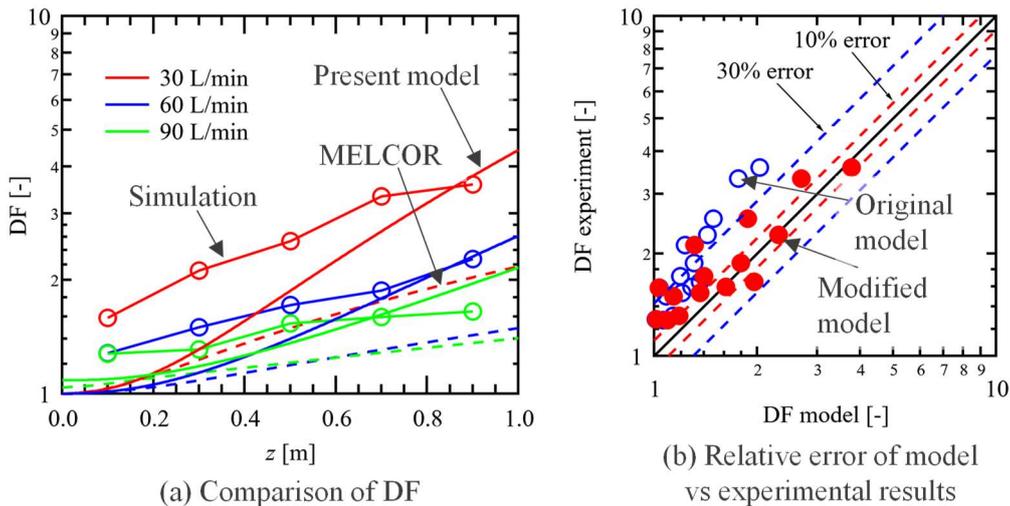


Fig. 10: プールスクラビングモデルの解析結果と実験結果の比較

## 第7章 結言

はじめに、既存モデルの想定と、実現象の乖離要因について調査することで、気泡内のエアロゾル運動が非定常な界面変形に影響を受けること、ならびに気泡が既存モデルの想定より大きく扁平していることを示した。次に、それらの乖離要因が具体的にどのようにエアロゾル輸送に寄与するかを明らかにするため、気泡の持つエアロゾルの輸送性能を実験的に評価し、MELCORが単一気泡における物質輸送現象を大幅に過小評価していることを示した。以上の結果をもとに、エアロゾルが実際にどのように輸送されることで、モデルと実現象の乖離に至ったかを調査するため、干渉縞計測を用いて気泡周囲のエアロゾル濃度場を計測した。計測結果より気泡周囲に非定常なエアロゾル濃度場が生じていることが分かったものの、気泡外からの計測だけでは、気泡内のエアロゾルにどのような駆動力が生じて除染に至るかについては明らかでなかった。そこで、新たに単一気泡におけるエアロゾル物質輸送を解析する固気液三相流数値流体解析コードを開発し、開発したコードと実験結果の比較を通じて、実現象を再現できる界面モデルを提案した。開発した数値解析モデルを用いることで、MELCORが気泡内の物質輸送係数を過小評価している原因として、まずは気泡形状についてはシミュレーション結果より新たな相関式を提案することで、 $Eo > 10$ 以降で適用可能な改良MELCORモデルを開発した。加えて、気泡形状を考慮してもなおシミュレーション結果を過小評価する原因として、気泡内流動場と局所物質輸送係数の比較を行い、気泡内外における流動の不連続性、および界面揺動により、単一気泡でエアロゾル輸送の促進や抑制が行われるメカニズムを解明した。最後に、単一気泡のエアロゾル輸送効果を気泡流全体で積分するプールスクラビングコードを開発し、実験から得られたDFと一致するかについての評価を実施した。その前段階として、気泡流条件において気泡径分布をモデル化し、DFのレファレンスデータを取得した。続いて、気泡内の流動場の遷移をモデルに反映するために $Eo$ 数と $Stk$ 数を用いて物質輸送係数を定式化し、MELCORモデルが流動を構成する全ての気泡径に対するエアロゾル輸送を考慮できるように改良を加えた。改良したモデルと実験結果が一致したことで、MELCORがDFを過小評価している原因を、気泡からの物質輸送の過小評価として説明できることを示した。一連の実験や解析を通じて、単一気泡におけるエアロゾル輸送現象を明らかにし、その影響をプールスクラビングのエアロゾル輸送モデルに組み込むことで、気泡流におけるDF実験結果を良好に再現するモデルを開発することに成功した。

## 参考文献

- [1] Sehgal, B. R. (2012). Nuclear Safety in Light Water Reactors : Severe Accident Phenomenology.
- [2] USNRC, "Severe accident risks: An assessment for five US nuclear power plants," NUREG-1150, 1991.

- [3] M. Swiderska-kowalczyk, M. Escudero-Berzal, M. Marcos-Crespo, M. Martin-Espigares, and J. Lopez-Jimenez, "State-of-the-art review on fission product aerosol pool scrubbing under severe accident conditions," 1996.
- [4] Kaneko, I., Fukasawa, M., Naito, M., Miyata, K., & Matsumoto, M. (1993). Experimental study on aerosol removal effect by pool scrubbing (No. NUREG/CP--0130-VOL. 1).
- [5] Ahn, K. I., Lee, K. H., Lee, S. W., Choi, G., & Hwang, S. W. (2021). Estimation of fission product source terms for the SGTR accident of a reference PWR plant using MELCOR and MAAP5. *Nuclear Engineering and Design*, 371, 110967.
- [6] Lind, T., Losch, N., HERRANZ, L. E., Mun, C., & MORANDI+, S. (2015). Advances on understanding of pool scrubbing for FCVS based on the PASSAM project. IAEA TECDOC SERIES, 185.
- [7] R. O. Gauntt, R. K. Cole, C. M. Erickson, R. G. Gido, R. D. Gasser, S. B. Rodriguez and M. F. Young, "MELCOR 1. 8. 5," Sandia National Laboratories, NUREG/CR 6119, 2001.
- [8] Fauske & Associates Incorporated, "MP4-Modular Accident Analysis Program for LWR Power Plants", 1994.
- [9] Owczarski, P. C., & Burk, K. W. (1991). SPARC-90: A code for calculating fission product capture in suppression pools (No. NUREG/CR-5765; PNL-7723). Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (United States). Div. of Regulatory Applications; Pacific Northwest Lab., Richland, WA (United States).
- [10] Ramsdale, S. A., Guntay, S., & Friederichs, H. G. (1995). BUSCA-JUN91. Reference manual for the calculation of radionuclide scrubbing in water pools (No. GRS--116). Gesellschaft fuer Anlagen-und Reaktorsicherheit (GRS) mbH.
- [11] Wassel, A. T., Mills, A. F., Bugby, D. C., & Oehlberg, R. N. (1985). Analysis of radionuclide retention in water pools. *Nuclear engineering and design*, 90(1), 87-104.
- [12] Herranz, L. E., Peyrés, V., Polo, J., Escudero, M. J., Espigares, M. M., & López-Jiménez, J. (1997). Experimental and analytical study on pool scrubbing under jet injection regime. *Nuclear technology*, 120(2), 95-109.
- [13] Dehbi, A., Suckow, D., & Guentay, S. (2001). Aerosol retention in low-subcooling pools under realistic accident conditions. *Nuclear Engineering and Design*, 203(2-3), 229-241.
- [14] Kanai, T., Furuya, M., Arai, T., & Nishi, Y. (2016). Development of an aerosol decontamination factor evaluation method using an aerosol spectrometer. *Nuclear Engineering and Design*, 303, 58-67.
- [15] Sun, H., Sibamoto, Y., Okagaki, Y., & Yonomoto, T. (2019). Experimental investigation of decontamination factor dependence on aerosol concentration in pool scrubbing. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2019.
- [16] Clift, R., Grace, J. R., & Weber, M. E. (2005). Bubbles, drops, and particles.
- [17] Bian, Y., Dong, F., Zhang, W., Wang, H., Tan, C., & Zhang, Z. (2013). 3D reconstruction of single rising bubble in water using digital image processing and characteristic matrix. *Particuology*, 11(2), 170-183.
- [18] E. M. A. Frederix, "Eulerian modeling of aerosol dynamics," University of Twente, 2016.
- [19] K. Hayashi and A. Tomiyama, "Interface Tracking Simulation of Mass Transfer from a Dissolving Bubble," *J. Comput. Multiph. Flows*, vol. 3, no. 4, pp. 247–261, 2011.
- [20] E. Olsson, G. Kreiss, and S. Zahedi, "A conservative level set method for two phase flow II," *J. Comput. Phys.*, vol. 225, no. 1, pp. 785–807, 2007.
- [21] A. Tomiyama, I. Kataoka, I. Zun, and T. Sakaguchi, "Drag Coefficients of Single Bubbles under Normal and Micro Gravity Conditions.," *JSME Int. J. Ser. B*, vol. 41, no. 2, pp. 472–479, 1998.
- [22] Takemura, F., & Yabe, A. (1998). Gas dissolution process of spherical rising gas bubbles. *Chemical Engineering Science*, 53(15), 2691–2699.
- [23] Lochiel, A. C., & Calderbank, P. H. (1964). Mass transfer in the continuous phase around axisymmetric bodies of revolution. *Chemical Engineering Science*, 19(7), 471–484.
- [24] N. Balcázar-Arciniega, O. Antepara, J. Rigola, and A. Oliva, "A level-set model for mass transfer in bubbly flows," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 138, pp. 335–356, 2019.
- [25] Yoshida, K. Fujiwara, Y. Nakamura, A. Kaneko and Y. Abe, "Experimental Study of Interfacial Area of Bubble Plume Based on Bubble Tracking by Wire-Mesh Sensor," *Nuclear Engineering and Design*, under press, 2022.