

平成 31 年度原子力規制庁委託成果報告書

原子力施設等防災対策等委託費  
(スクラビング個別効果試験) 事業

国立大学法人筑波大学

令和 2 年 3 月

本報告書は,原子力規制委員会原子力規制庁からの委託により実施した業務の成果をとりまとめたものです.

本報告書に関する問い合わせは,原子力規制庁までお願いします.

## 目次

1. 単一気泡によるエアロゾル挙動測定実験.....	1
1.1. 単一気泡の多次元計測.....	1
1.1.1. 実験装置の設備・整備.....	1
1.1.2. 気泡画像の二方向可視化画像を用いた三次元再構成手法.....	3
1.1.3. 気泡の三次元形状計測結果.....	7
1.2. 気泡内部におけるエアロゾルの可視化および DF 計測.....	12
1.2.1. 単一気泡の可視化画像を用いたエアロゾル濃度の計測.....	12
1.2.2. 単一気泡における DF の計測.....	18
1.3. 気泡周囲の流動場における濃度分布計測.....	25
1.3.1. 実験装置の設備・整備.....	25
1.3.2. 気泡周囲における濃度場計測手法.....	28
1.3.3. 気泡周囲における濃度場計測結果.....	32
1.3.4. 気泡界面における濃度場計測結果.....	35
1.3.5. 薄型水槽を用いた気泡計測結果.....	37
1.4. 本章の結言.....	40
2. 気泡の 2 相流挙動測定実験.....	41
2.1. 気泡挙動の把握および整理.....	42
2.1.1. ボイド率計測装置の改良.....	42
2.1.2. ボイド率計測実験体系.....	46
2.1.3. 混合ガウスモデルによる気泡径データ分類処理手法.....	49
2.1.4. 混合ガウスモデルによる分類処理結果.....	51
2.2. 二相流の詳細計測.....	57
2.2.1. 流動挙動およびエアロゾル挙動の可視化計測.....	57
2.2.2. 二相流におけるボイド率・気相速度・気泡径計測結果.....	59
2.2.3. 二相流におけるエアロゾル計測および DF 計測.....	64
2.2.4. サブマージェンスによるエアロゾル除去効果への影響.....	66
2.2.5. ガス流量によるエアロゾル除去効果への影響.....	73
2.2.6. 凝縮性ガス混合によるエアロゾル除去効果への影響.....	75
2.2.7. 粒子の水溶性によるエアロゾル除去効果への影響.....	76
2.3. 流動現象のモデル化の検討.....	78
3. 実験解析.....	81
3.1. 解析体系および解析条件.....	81
3.2. MELCOR による解析結果.....	83
3.3. 筑波大学の二相流実験と解析結果の比較.....	87

## 目次

図 1.1	本研究で用いた実験装置.....	2
図 1.2	本年度設備したエアロゾル環流水槽.....	2
図 1.3	2d および 3d 気泡アスペクト比計測手法の比較.....	3
図 1.4	Bian らの手法における特徴点の定義.....	4
図 1.5	3d 計測を行うための特徴点検出用画像処理手法.....	5
図 1.6	気泡画像の三次元再構成結果.....	7
図 1.7	空気単相条件における時系列アスペクト比計測結果.....	8
図 1.8	空気単相条件における時系列気泡径計測結果.....	8
図 1.9	CsI 条件における時系列アスペクト比計測結果.....	9
図 1.10	CsI 条件における時系列気泡径計測結果.....	10
図 1.11	2d 計測条件におけるアスペクト比と MELCOR の比較.....	11
図 1.12	3d 計測条件におけるアスペクト比と MELCOR の比較.....	11
図 1.13	単一気泡の可視化画像を用いたエアロゾル濃度の計測に用いた実験装置.....	13
図 1.14	単一気泡の DF 計測に用いたエアロゾルの粒径分布.....	13
図 1.15	エアロゾルを含む気泡の可視化結果.....	14
図 1.16	水面におけるエアロゾル濃度の計測結果.....	15
図 1.17	本計測で行ったデータ処理の定義.....	16
図 1.18	画像処理手法ごとの無次元輝度と気泡内エアロゾル濃度の関係.....	17
図 1.19	本実験で使用した粒子ごとの無次元輝度とエアロゾル濃度の関係.....	18
図 1.20	単一気泡の DF 計測に用いた実験装置.....	19
図 1.21	各サブマージェンスで計測された入口および出口エアロゾル濃度.....	20
図 1.22	エアロゾル個数ベースの DF.....	21
図 1.23	グリセリン粒子条件におけるサブマージェンスごとの粒径分布.....	22
図 1.24	CsI 粒子条件におけるサブマージェンスごとの粒径分布.....	22
図 1.25	エアロゾル質量ベースの DF.....	24
図 1.26	DF 計測結果と既存の研究の比較.....	25
図 1.27	気泡界面およびその周囲における濃度場計測に用いた実験装置.....	26
図 1.28	新旧プリズムによる計測範囲の比較.....	26
図 1.29	本年度設備した光学部品およびその調整.....	27
図 1.30	新旧プリズムによる視野の比較.....	27
図 1.31	本年度追設した試験用水槽.....	28
図 1.32	本研究で設備した干渉計を用いて撮影した画像.....	28
図 1.33	干渉縞画像の FFT 結果.....	30
図 1.34	干渉縞画像の離散化結果.....	31
図 1.35	GMM による理クラスタリングおよびフィルターの作成結果.....	32

図 1.36	GMM 法により抽出された位相情報.....	32
図 1.37	旧プリズムによる等価直径 3 mm の気泡に対する可視化計測結果.....	33
図 1.38	新プリズムによる等価直径 6.5 mm の気泡に対する可視化計測結果.....	34
図 1.39	気泡界面における極座標の定義.....	35
図 1.40	旧プリズムによる等価直径 3 mm の気泡界面における位相分布.....	35
図 1.41	新プリズムによる等価直径 6.5 mm の気泡界面における位相分布.....	36
図 1.42	気泡界面における各端点および垂線の定義.....	36
図 1.43	等価直径 6.5 mm の気泡端点から延びる垂線に沿った位相分布.....	37
図 1.44	薄型水槽による気泡に対する可視化計測結果.....	38
図 1.45	薄型水槽による Taylor bubble の気泡界面における位相分布.....	39
図 2.1	ボイド率計測装置の概要.....	42
図 2.2	本年度に設備したバッファタンクの外観.....	43
図 2.3	バッファタンクの有無によるエアロゾル濃度計測結果.....	43
図 2.4	本年度設備したノズルと従来ノズルの比較.....	44
図 2.5	本年度設備した気相加熱装置の外観.....	44
図 2.6	本年度設備した WMS の模式図.....	45
図 2.7	本年度設備した WMS の外観.....	46
図 2.8	ボイド率計測体系図.....	47
図 2.9	エアロゾル発生器模式図.....	48
図 2.10	プール水面付近における流動挙動およびエアロゾル挙動の計測体系模式図.....	49
図 2.11	気相噴流中に残存する大気泡.....	49
図 2.12	個数基準の気泡径分布と体積加重した気泡径分布.....	50
図 2.13	気泡径分布に対する混合ガウスモデルによるクラスタリング処理結果.....	51
図 2.14	混合ガウスモデルによる小気泡成分の分析結果と MELCOR との比較.....	53
図 2.15	混合ガウスモデルによる大気泡成分の分析結果と MELCOR との比較.....	54
図 2.16	総気相流量一定条件における大気泡成分の体積割合の比較.....	55
図 2.17	総気相流量一定条件の小気泡成分および大気泡成分の平均気泡径の比較.....	56
図 2.18	エアロゾル条件ごとの大気泡および小気泡径とサブマージェンスの関係.....	57
図 2.19	大気泡および小気泡の体積割合とサブマージェンスの関係.....	57
図 2.20	大気泡による高濃度エアロゾル輸送.....	58
図 2.21	プール水面付近のエアロゾル個数濃度.....	59
図 2.22	断面平均ボイド率分布と断面平均気相速度.....	60
図 2.23	各エアロゾル条件における平均ボイド率とサブマージェンスの関係.....	61
図 2.24	各サブマージェンスにおける気泡径分布.....	61
図 2.25	各エアロゾル条件における個数平均気泡径とサブマージェンスの関係.....	62
図 2.26	各エアロゾル条件における平均気相流速とサブマージェンスの関係.....	63

図 2.27	エアロゾルスペクトロメータのセンサ部模式図	64
図 2.28	インレットおよびアウトレットエアロゾルの非同時 DF 計測手法	65
図 2.29	インレットおよびアウトレットエアロゾルの同時 DF 計測手法	66
図 2.30	サブマージェンスごとの粒子径分布の比較	67
図 2.31	エアロゾルの質量平均径・個数平均径・幾何平均径の変化の比較	68
図 2.32	サブマージェンスに対する粒径ごとの DF	69
図 2.33	除染効果と二相流動現象との相関関係	70
図 2.34	DF 計測結果と既存研究 <sup>[7][8]</sup> における DF との比較	72
図 2.35	インレットおよびアウトレットエアロゾル非同時 DF 計測の誤差評価	73
図 2.36	CsI の入口および出口で計測された粒径分布	73
図 2.37	各流量で計測された粒径と DF の関係	74
図 2.38	各流量で計測されたサブマージェンスと DF の関係	75
図 2.39	蒸気-空気混合ガスおよび空気単相条件における DF 計測結果の比較	76
図 2.40	シリカの入口および出口で計測された粒径分布	77
図 2.41	粒子の水溶性における DF とサブマージェンスの関係	77
図 2.42	実験および MELCOR 解析によるサブマージェンスに対する DF の比較	79
図 2.43	二相流モデルの改良案	80
図 3.1	解析体系	81
図 3.2	各変数の定義	84
図 3.3	各解析条件におけるエアロゾル質量の時間推移 ( $z = 1100$ mm)	84
図 3.4	MELCOR が出力した DF と算出した DF の比較 ( $z = 1100$ mm)	85
図 3.5	各解析条件におけるプール水温と飽和温度の比較 ( $z = 1100$ mm)	86
図 3.6	各解析条件におけるフローパスの水質量の推移 ( $z = 1100$ mm)	86
図 3.7	各解析条件におけるサブマージェンスごとの DF 解析結果	87
図 3.8	実験結果および解析結果の粒径ごとの DF の比較	88
図 3.9	実験および MELCOR 解析による蒸気-空気混合条件における DF の比較	88
図 3.10	実験結果および解析結果のサブマージェンスごとの DF の比較	89
図 3.11	単一気泡実験, 二相流実験および MELCOR による DF との比較	90

## 表目次

表 1-1	気泡形状の計測で使用した微粒子の物性 .....	3
表 1-2	単一気泡の DF 計測に使用したエアロゾルの物性 .....	13
表 1-3	グリセリン粒子条件におけるサブマージェンスごとの粒子数.....	22
表 1-4	CsI 粒子条件におけるサブマージェンスごとの粒子数.....	23
表 2-1	既存および新型ボイド率計測装置(WMS)の概要 .....	45
表 2-2	主要な実験パラメータ .....	47
表 2-3	パラメータによる流動影響への評価に用いた実験条件マトリックス.....	51
表 2-4	WMS 計測における共通条件.....	52
表 2-5	総気相流量一定条件におけるパラメータによる流動影響への評価に用いた実験条件マトリックス.....	54
表 2-6	プール水面可視化実験条件 .....	57
表 2-7	パラメータによる流動影響への評価に用いた実験条件マトリックス.....	59
表 2-8	サブマージェンス毎の DF 計測条件 .....	66
表 2-9	凝縮ガス混合時の DF 計測条件 .....	75
表 2-10	エアロゾルの特性 .....	76
表 3-1	解析条件 .....	82





# 1. 単一気泡によるエアロゾル挙動測定実験

本研究ではプールスクラビング時における気泡発生からその上昇、液面到達までにおける単一気泡又は少数気泡の挙動及び気泡内外の詳細なエアロゾルの挙動を高い時空間解像度で把握するための実験を実施する。本研究では水を溜めた実験部容器内にエアロゾルが混入したガスを流入させ、単一又は少数気泡を発生させる。その際の気泡と気泡内外のエアロゾル挙動を高速度カメラやPIV等を使用して詳細に計測する。

今年度は、昨年度までに設備した実験装置のレーザー発信機等の計測機能を改良し、昨年度までに得られた知見を元に多次元計測技術を用いて気泡周囲の流動場を計測する。また、昨年度までに検討した気泡界面およびその周囲における可溶性エアロゾル濃度の計測については、水槽などの追設により、さらに精度の高い計測技術として確立し挙動を明らかにする。

## 1.1. 単一気泡の多次元計測

### 1.1.1. 実験装置の設備・整備

本実験においては、気泡の形状を三次元計測する手法を開発し、MELCORにおける気泡形状の実験相関式と比較した。本研究に用いた実験装置を図 1.1 に示す。実験装置は八角形の透明なポリカーボネートからなる可視化水槽 (340×340×1500 mm)と、ハイスピードカメラ (UX100, Photron 社製)二台、50 mm レンズ (AI Nikkor 50mm f/1.2S, Nikon 製)と、それぞれのカメラの対角線上にバックライト光源からなる光学系で構成されている。本計測においては入口のエアロゾル濃度を安定させるために光学系は上下可能な台の上に設置されており水槽の水深方向を上下することができる。本計測におけるサブマージェンスは 1000 mm であり、水槽の下部から内径  $d=3$  mm の L 字ノズルを通じてエアロゾルを含むシリンジを押すことで気泡を射出した。

今年度は、気泡の界面をより精密に計測するための高輝度バックライトレーザー光源およびレーザー光源のヘッド位置を調整するための駆動軸を設備した。また、昨年まで定流量でエアロゾルを生成する際にエアロゾル濃度が安定しない問題があった。この問題を解決するため、エアロゾルを一度バッファタンクに貯め、内部で循環させて濃度を安定するエアロゾル環流水槽(図 1.2)を追設した。

本研究においては空気単相、親水性シリカ( $\text{SiO}_2$ )、硫酸バリウム( $\text{BaSO}_4$ )、ヨウ化セシウム( $\text{CsI}$ )の四条件において計測を行った。本計測で使用した微粒子の物性を表 1-1 に示す。粒子の選定基準としては実機条件と同様の  $\mu\text{m}$  – Sub- $\mu\text{m}$  オーダーの粒径であること、また、昨年度までの研究でエアロゾルの溶性が気泡形状に影響する結果が得られた<sup>[1]</sup>。そこで、本研究においてもそれぞれ可溶性および不溶性の粒子を選定した。

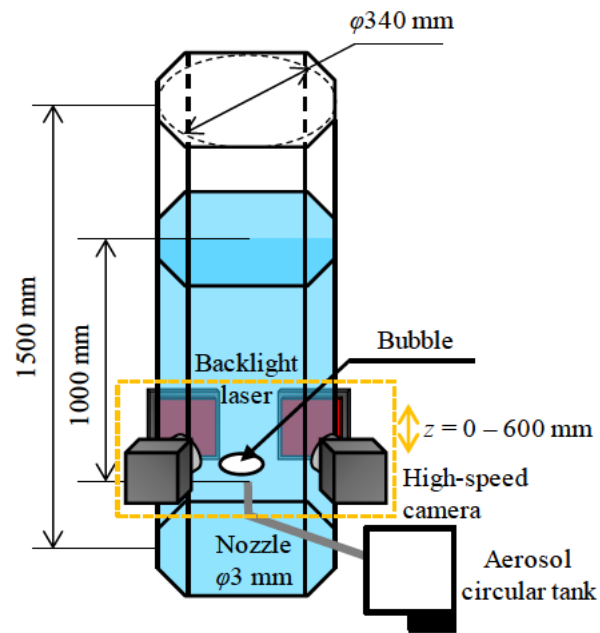


図 1.1 本研究で用いた実験装置



図 1.2 本年度設備したエアロゾル環流水槽

表 1-1 気泡形状の計測で使用した微粒子の物性

	Diameter [m]	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Solubility to water
	×10 <sup>-6</sup>	×10 <sup>3</sup>	×1
Fumed silica (SiO <sub>2</sub> )	0.04	1.8	Insoluble
Barium sulfate (BaSO <sub>4</sub> )	0.64	4.5	Insoluble
Caesium iodide (CsI)	1.0 – 1.2	4.5	Soluble

### 1.1.2. 気泡画像の二方向可視化画像を用いた三次元再構成手法

本研究において行う気泡の三次元計測手法の概要を図 1.3 に示す. 図 1.3 (a)に示す気泡のアスペクト比計測においては 2 方向から撮影した気泡のアスペクト比の長辺と短辺の平均値を計測することで気泡の形状を計測していた. しかしながら, MELCOR モデルにおいては気泡の形状を三次元の扁球と仮定しているため, 従来の計測においては気泡の回転など三次元性を考慮できない可能性があった. そこで, 本研究においては気泡の二方向計測結果から三次元の扁球に再構成することで気泡の三次元性を考慮したアスペクト比の計測を行う.

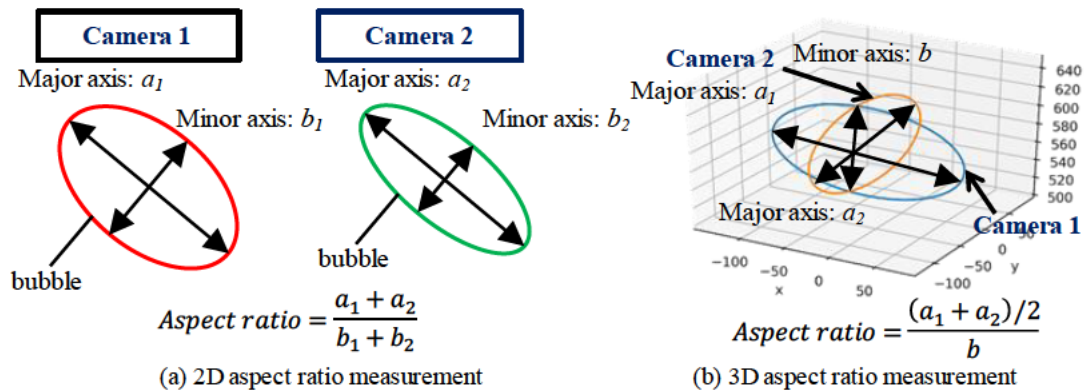


図 1.3 2d および 3d 気泡アスペクト比計測手法の比較

本研究においては Bian ら(2013)<sup>[2]</sup>によって提案されている三次元再構成手法を用いて気泡形状の再構成を行った. 以下に三次元再構成手法を示す.

平行移動成分を除いた扁球の基礎式は各座標(x, y, z)および未定係数(a<sub>11</sub>, a<sub>22</sub>, a<sub>33</sub>, a<sub>12</sub>, a<sub>13</sub>, a<sub>23</sub>)を用いて以下のように表される:

$$a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + a_{33}z^2 + 2a_{12}xy + 2a_{13}xz + 2a_{23}yz - 1 = 0. \quad (1-1)$$

ここで, 未定係数を A にまとめてベクトル表記にすると以下のように表される:

$$\begin{aligned}
 x^T A x &= 0 \\
 x &= (x, y, z)^T \\
 A &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{12} & a_{22} & a_{23} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{bmatrix}
 \end{aligned}
 \tag{1-2}$$

以上から，未定係数  $A$  を求めることができると扁球の形状を求めることができる．そこで，Bian らの研究においては気泡の二次元二方向の計測結果から得られる情報として遠地点(apogee point)および頂点 (culminating point)の二点に着目し，これらの点を特徴点として計測を行った．図 1.4 に本計測における特徴点の定義を示す．本計測においては画像から得られた気泡の楕円フィッティングのデータをもとにデータ処理を行った結果を図 1.5 に示す．

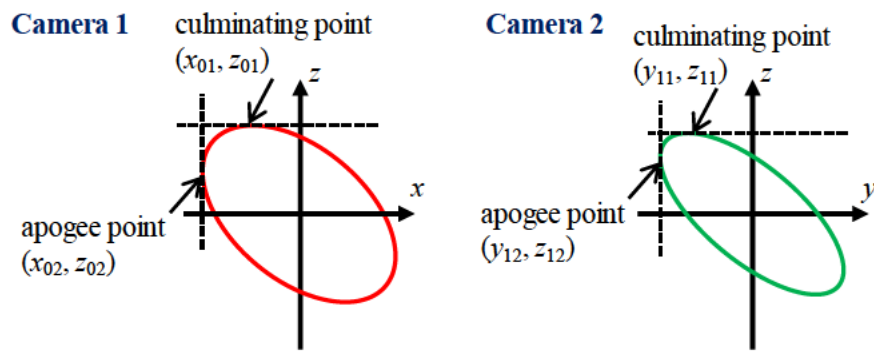


図 1.4 Bian らの手法における特徴点の定義

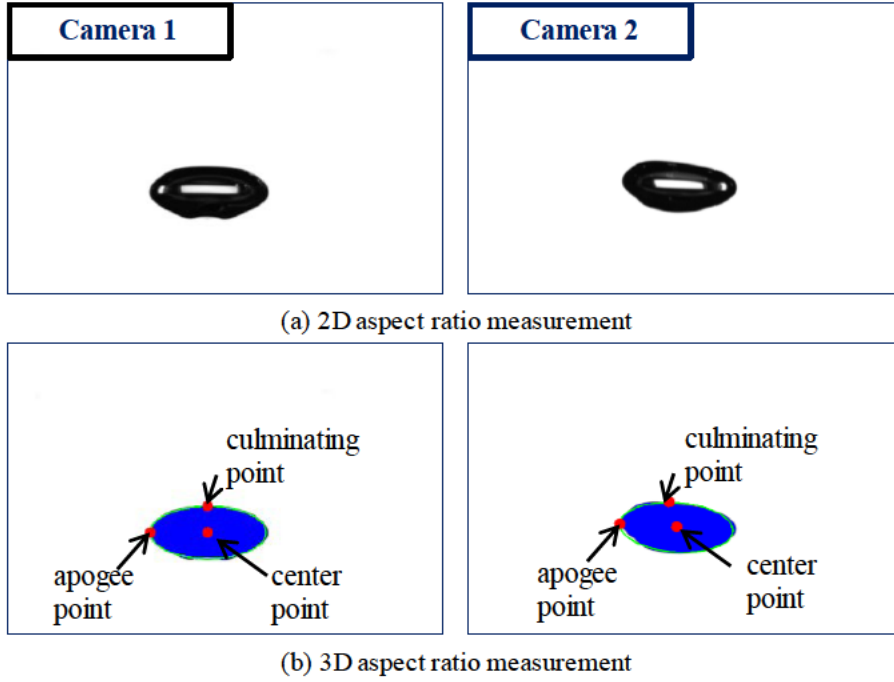


図 1.5 3d 計測を行うための特徴点検出用画像処理手法

特徴点は気泡を三次元にした際にそれぞれ気泡の遠地点および頂点に対応すると考えると、扁球の二つの遠地点 $(x_0, y_0, z_0)$ 、 $(x_1, y_1, z_1)$ および頂点 $(x_2, y_2, z_2)$ と二次元の特徴点は以下のように対応付けられる:

$$\begin{cases} (0, y_{12}, z_{12}) = (x_0, y_0, z_0) \\ (x_{02}, 0, z_{02}) = (x_1, y_1, z_1) \\ (x_{01}, y_{11}, z_{01}) = (x_2, y_2, z_2) \end{cases} \quad (1-3)$$

ここで、扁球の一般式を以下のようにすると:

$$F(x, y, z) = a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + a_{33}z^2 + 2a_{12}xy + 2a_{13}xz + 2a_{23}yz - 1, \quad (1-4)$$

式(1-3)の三点がそれぞれ扁球の上に存在することおよび頂点が  $x - y$  平面に対して水平という仮定から以下の 5 式が導出される:

$$\begin{cases} F(x_0, y_0, z_0) = 0 \\ F(x_1, y_1, z_1) = 0 \\ F(x_2, y_2, z_2) = 0 \\ F'_x(x_2, y_2, z_2) = 0 \\ F'_y(x_2, y_2, z_2) = 0 \end{cases} \quad (1-5)$$

ここで、式(1-2)における未定係数  $A$  の要素数は 6 つであるため、最後の要素に対しては  $a_{33}$  に対して任意の値を置き、最適化を行うことですべての未定要素を導出する。式(1-2)より本行列を対角化することで式(1-6)のように気泡の各辺の長さが、対角化行列  $R$  から式(1-7)のように回転行列がそれぞれ導出される。

$$A = R\Lambda R^T$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} = \text{diag}\left(\frac{1}{b^2}, \frac{1}{a_1^2}, \frac{1}{a_2^2}\right) \quad (1-6)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ \sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (1-7)$$

$$= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

以上をもとに扁球の回転量( $\alpha, \beta, \gamma$ )は以下のように表される:

$$\alpha = \text{Atan2}\left(\frac{r_{21}}{\cos \beta}\right)$$

$$\beta = \text{Atans}\left(-r_{31}\sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2}\right) \quad (1-8)$$

$$\gamma = \text{Atans}(r_{32}/\cos \beta, r_{33}/\cos \beta).$$

以上の計算結果をもとに気泡の二次元画像をもとに三次元再構成を行った結果を図 1.6 に示す。本手法を用いて以降の気泡形状を計測し、その結果について考察する。

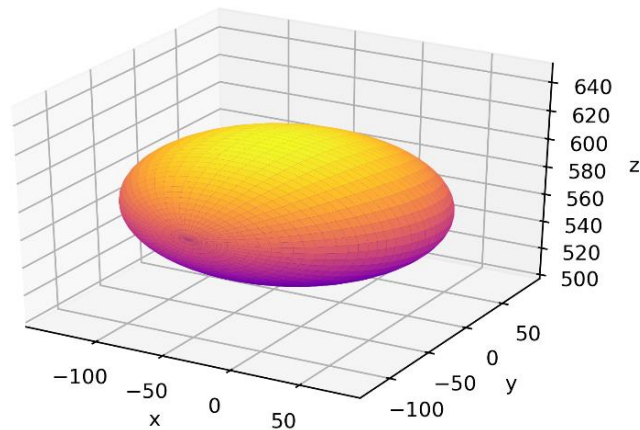


図 1.6 気泡画像の三次元再構成結果

### 1.1.3. 気泡の三次元形状計測結果

図 1.3 に示す 2d および 3d の計測手法で気泡の形状を計測した．空気単相条件で気泡のアスペクト比を計測した結果を図 1.7 に示す．青い線で高さ  $z = 0 \text{ mm}$  付近の計測結果を，赤い線で高さ  $z = 600 \text{ mm}$  付近の計測結果をそれぞれ示す．計測結果からは  $z = 0 \text{ mm}$  においては気泡の計測結果ら 2d と 3d の計測においてほとんど差がないことが分かる．これは，気泡を射出した直後においては気泡の平面回転の影響が小さく，三次元性を考慮しなくても気泡の計測ができるからだと考えられる．一方で， $z = 600 \text{ mm}$  では 3d の計測結果が一貫して 2d の計測結果より大きな傾向がみられた．これは，気泡が上昇することで徐々に三次元性の影響が卓越してくることを示している．これは，既存の気泡研究で気泡の上昇挙動がジグザク運動のような平面内の運動かららせん運動のような三次元性を伴う運動に遷移していくこと<sup>[3]</sup>と対応している．また， $z = 600 \text{ mm}$  の計測結果から分かるように気泡の三次元性を考慮することで，気泡自体のアスペクト比の時系列変化も大きくなる傾向が得られた．この結果は，気泡自体の振動の影響が従来の見積もりよりさらに大きいことを示唆している．図 1.8 に空気単相条件における気泡径の時系列変化を計測した結果を示す．従来の 2d 計測においては気泡の三次元性が卓越するノズルから離れる  $z = 600 \text{ mm}$  の領域においてノズル射出直後の  $z = 0 \text{ mm}$  と比較して気泡径が大きく見積もられていたことが分かる．これに対して，3d 計測の結果では  $z = 600 \text{ mm}$  においても  $z = 0 \text{ mm}$  と同等の気泡径が計測された．これは，気泡の三次元性を考慮することでより気泡の形状を正しく評価できたことを示している．

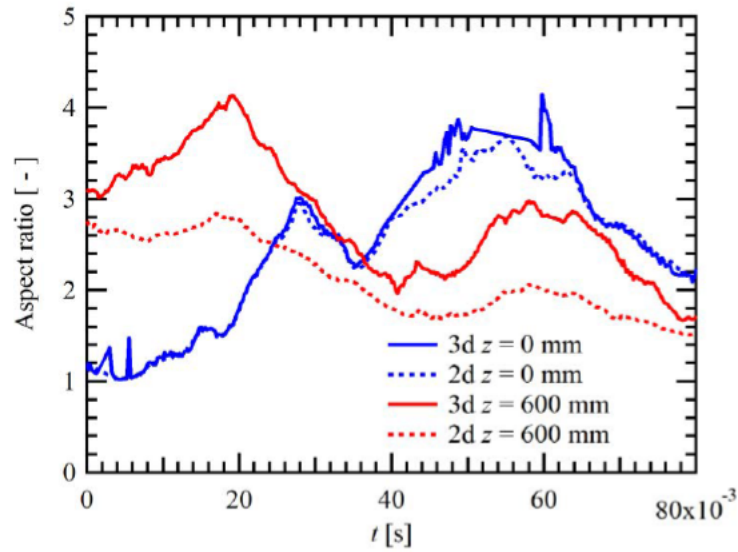


図 1.7 空気単相条件における時系列アスペクト比計測結果

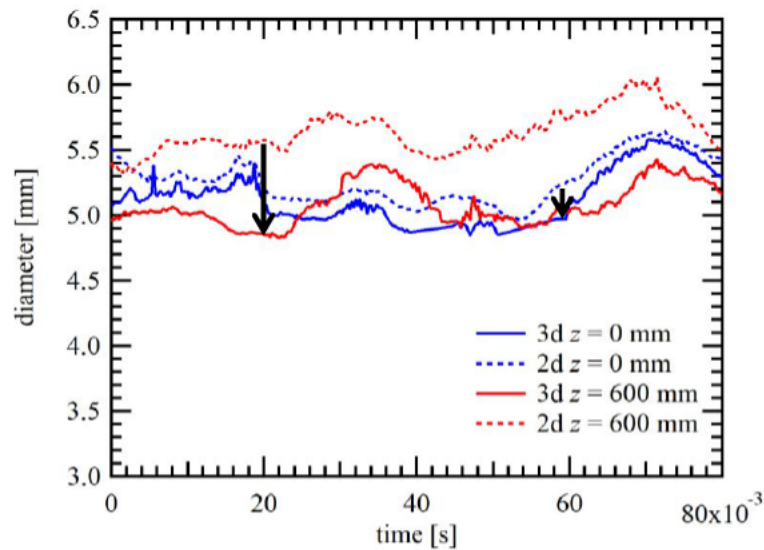


図 1.8 空気単相条件における時系列気泡径計測結果

CsI 条件で気泡のアスペクト比を計測した結果を図 1.9 に示す。青い線で高さ  $z = 0$  mm 付近の計測結果を、赤い線で高さ  $z = 600$  mm 付近の計測結果をそれぞれ示す。計測結果からはいずれの高さにおいても 2d と 3d の計測結果が大きく変化しないことを示している。昨年度までの研究で、可溶性粒子である CsI 条件の気泡が界面活性剤を含む液中の気泡と同様の傾向を示すことを示した。富山ら(2002)<sup>[3]</sup>は、界面活性剤中の気泡が上昇する際に、高い水位においても平面内のジグザグ運動をするとしている。本研究において 2d と 3d の



計測結果に大きな差がみられなかった原因として、気泡運動の三次元性が顕著でなかったためと考えられる。また、一部の時系列データにおいて気泡のアスペクト比を正しく評価できない箇所があった。これは、気泡の形状計測の最適化アルゴリズムが一部の条件において機能しなかったからと考えられ、平均をとる際は指数加重移動平均(EWMA)を用いて外れ値の除去を行った。図 1.10 に CsI 条件において気泡の等価直径を計測した結果を示す。アスペクト比の計測結果と同様に、どの高さにおいても 2d と 3d の差が大きく見られなかった。

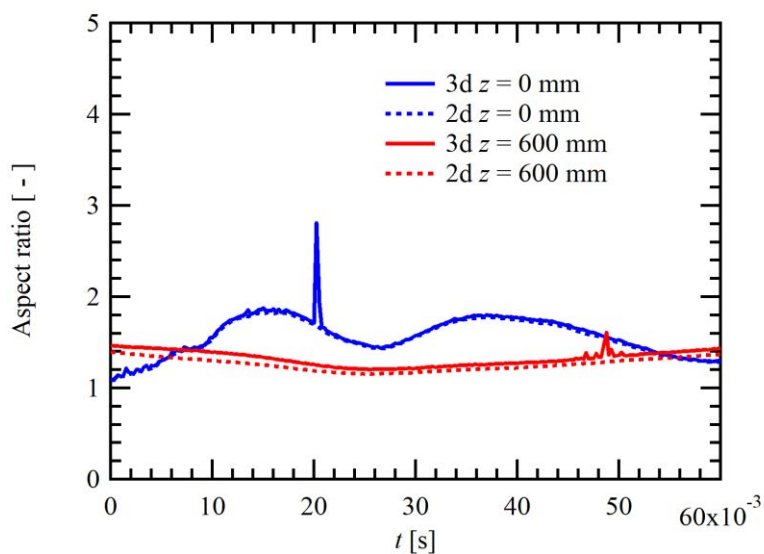


図 1.9 CsI 条件における時系列アスペクト比計測結果

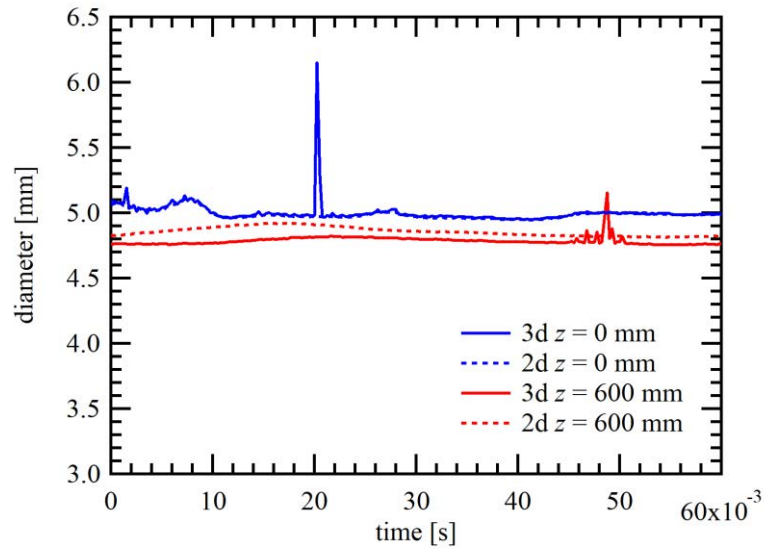


図 1.10 CsI 条件における時系列気泡径計測結果

図 1.11 に空気単相, OX50, BaSO<sub>4</sub>, CsI の 4 条件において各水深で気泡のアスペクト比を 2d 計測で測定した平均値を示す. また, 実線において MELCOR で使用される気泡アスペクト比を示す. MELCOR における実験相関式は, D. D. Paul らの実験式 (1985)<sup>[4]</sup>により以下のように示される:

$$E = \begin{cases} 1 & (d_B < 0.15) \\ 0.84107 + 1.13466d + 0.3795d_B^2 & (0.15 < d_B < 1.3). \\ 1.675 & (d_B > 1.3) \end{cases} \quad (1-9)$$

$d_B$  [cm]: 気泡径

$E$  [-]: 気泡アスペクト比

同様のプロットを用いて図 1.12 の 4 条件において各水深で気泡のアスペクト比を 3d 計測で測定した平均値を示す. 図 1.11 および図 1.12 の計測結果を比較すると, CsI 条件においては 2d および 3d のどちらの計測においても MELCOR における実験相関式と比較してよい一致を示す. 一方で, 空気単相や不溶性粒子である OX50, BaSO<sub>4</sub> 条件においては 2d の計測結果と比較して 3d の計測においてアスペクト比がさらに大きい傾向を示す. これは, 気泡の三次元性を考慮することで, 空気単相や不溶性粒子の条件において従来の想定と比較して気泡のアスペクト比が MELCOR における値からさらに過大評価することを示している.

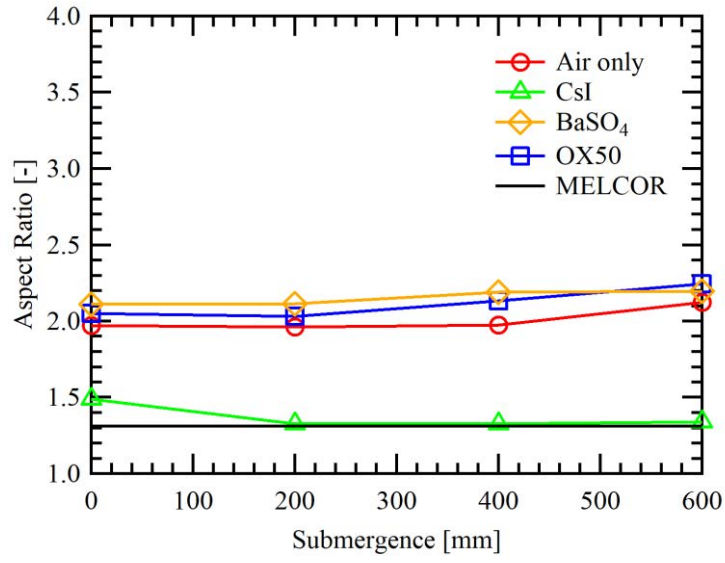


図 1.11 2d 計測条件におけるアスペクト比と MELCOR の比較

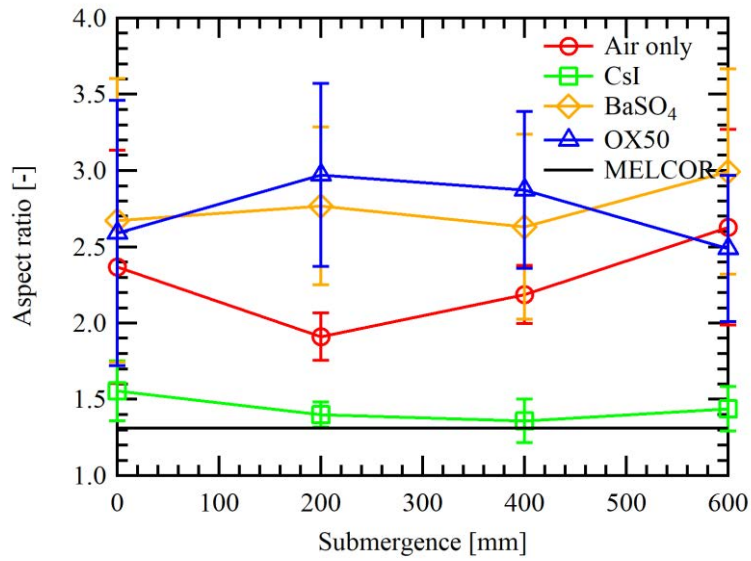


図 1.12 3d 計測条件におけるアスペクト比と MELCOR の比較

## 1.2. 気泡内部におけるエアロゾルの可視化および DF 計測

### 1.2.1. 単一気泡の可視化画像を用いたエアロゾル濃度の計測

気泡上昇領域における DF の評価を行うため、除染現象の素過程である単一気泡におけるエアロゾル除染性能を評価するための実験を行った。本研究においては除染性能を評価するために気泡の入口エアロゾル濃度から出口濃度を除すことでエアロゾルの除去量を評価する除染係数(DF)に着目して研究を行った。本研究に用いた実験装置を図 1.13 に示す。実験装置は八角形の透明なポリカーボネートからなる可視化水槽 (340×340×1500 mm)と、ハイスピードカメラ (UX100, Photron 社製)、マクロビデオズームレンズと、それぞれのカメラの対角線上にバックライト光源からなる光学系で構成されている。水槽の下部には内径  $d=3\text{ mm}$  の L 字ノズルが設置されており、サブマージェンスはノズルの位置を原点として 30 mm において行った。水面にはサンプリング用のノズルが設置されており、5 L/min で常に吸引を行い、その際のエアロゾル濃度を計測した。すべての実験は常温常圧条件において行った。

本研究においてはエアロゾルの物性が DF に与える影響を調べるために二種類のエアロゾルを用いて計測を行った。本実験において使用したエアロゾルの物性を表 1-2 に示す。本研究においてはエアロゾルとしてグリセリン水溶液および CsI 水溶液を微粒化した粒子を使用した。これらの粒子を選定する条件としては i)実事故で想定される  $\mu\text{m}$  から Sub- $\mu\text{m}$  オーダーのエアロゾル<sup>[5]</sup>であること、ii)エアロゾルの発生手法として共に慣性力に大きく依存しない湿式のエアロゾル発生装置で発生できることの二つの基準をもとに粒子を選定した。本研究で用いるエアロゾルをエアロゾルスペクトロメータ(welas-2000, Palas GmbH 製)を用いて粒径分布を計測した結果を図 1.14 に示す。計測結果からグリセリン粒子の方が CsI 粒子と比較して全体的に大きな径を持つ傾向が得られた。

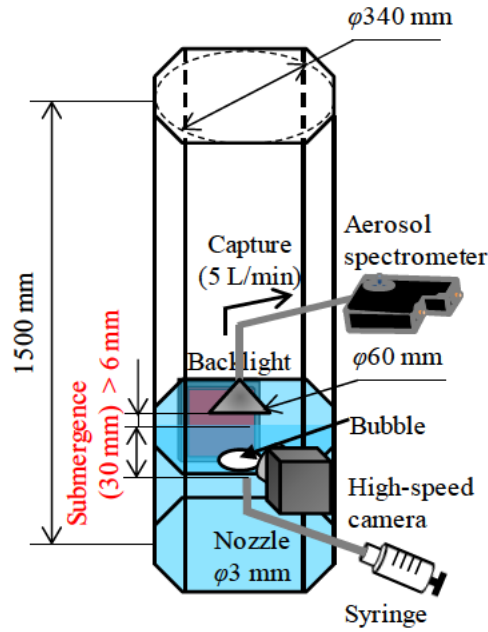


図 1.13 単一気泡の可視化画像を用いたエアロゾル濃度の計測に用いた実験装置

表 1-2 単一気泡の DF 計測に使用したエアロゾルの物性

Particle	Generator	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Concentration [p/cm <sup>3</sup> ]	Solubility
Glycerin solution	PS-2006	1100	0.0 - 6.0E4	Soluble
CsI solution	ATM-226	1500	3.0E4-1.0E5	Soluble

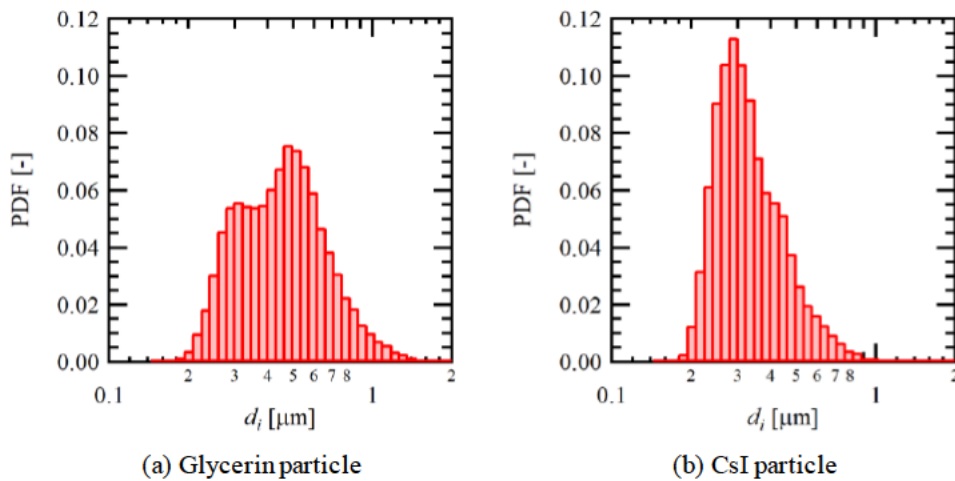


図 1.14 単一気泡の DF 計測に用いたエアロゾルの粒径分布

以上の実験装置を用いて単一気泡における DF を計測する前段階として気泡の内部にお

けるエアロゾルの初期濃度を計測するための手法を開発した。既存の研究においては<sup>[9]</sup>気泡を注入するためのエアロゾル注入装置の内部のエアロゾル濃度を計測することで気泡の内部におけるエアロゾル濃度と等価としているが、実際にはエアロゾルの等速吸引などを行っていないため、装置内部のエアロゾル濃度と気泡内部のエアロゾル濃度が等価とは考え難い。そこで、本研究においては単一気泡内部の情報を直接利用することで気泡の内部に含まれているエアロゾルの濃度を直接計測する手法を開発することとした。本研究では、気泡がノズルから離脱する瞬間の画像に着目し、気泡の内部の可視化を行った。気泡の内部にエアロゾルなし、グリセリン粒子あり、CsI粒子ありの三条件でそれぞれ可視化を行った結果を図 1.15 に示す。計測の再現性を確保するため、LED の出力は撮影ごとに照度計を用いてカメラの中心位置で一定になるように調整した。撮影は 1000 fps、シャッタースピード 1/16000 s で行い、気泡がノズルから離れた最初のフレームを取り出すものとした。可視化結果より、気泡の周囲においては黒い領域が、気泡の内部においては背景とほぼ同じ輝度の領域がみられた。気泡の界面が黒くなる理由としては気液界面における屈折率差の影響によりバックライトの光が屈折することが原因である。一方で、気泡の内部が背景とほぼ同じ輝度となることは曲率の小さい気泡の中心部分においてはバックライトの光が透過していることを示唆している。このバックライトが透過している領域に着目すると、特にグリセリン粒子条件で気泡内部においてバックライトより暗いことが分かる。これは、エアロゾルを光が通過することで光が屈折するからであると考えられる。そこで、この屈折により輝度値が変化することを利用して気泡内部におけるエアロゾルの初期濃度を計測することとした。

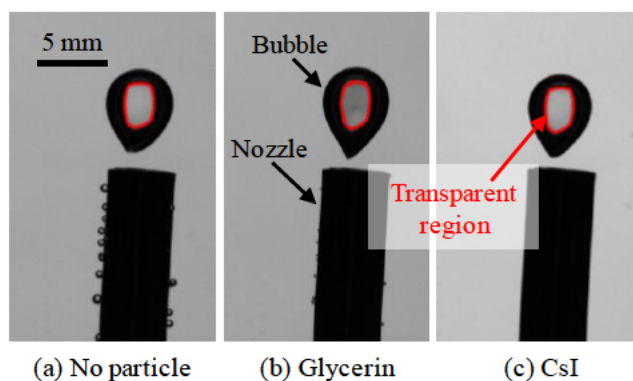


図 1.15 エアロゾルを含む気泡の可視化結果

気泡の内部におけるエアロゾルの濃度を計測するために気泡が水中に射出された直後の気泡内部におけるエアロゾルを計測した。本計測においてはサブマージェンスを極めて低い値 (30 mm) とおくことで、気泡内部に注入されたエアロゾルを撮影し、その後すぐ図 1.13 に示すサンプリングノズルで回収をすることで気泡内部におけるエアロゾルの個数を計測する。エアロゾルのサンプリングは 5 L/min で行われており、気泡の体積  $6.5e-5$  L (等価直径 5 mm 程度とする) と比較して十分に高い流量で吸引することで気泡内部に含まれるエアロ

ゾルを全て吸引し、その個数を積分することで気泡の初期エアロゾル個数  $N$  を計測した。計測は 0.1 s の間隔で行った。低サブマージェンス条件における水面でのエアロゾル個数計測の結果を図 1.16 に示す。図の赤いプロットが気泡にエアロゾルを混入した条件、青いプロットが気泡にエアロゾルを混入しない条件である。このように、気泡にエアロゾルを混入したときのみ気泡が水面に到達し、エアロゾルを放出することでエアロゾルが計測される。また、気泡がない状態でもバックグラウンドで一定量のエアロゾルが計測されることも分かる。そこで、バックグラウンドにおけるエアロゾル濃度の影響を最小とするためにエアロゾルの個数が最大となる地点を中心としてその前 0.5 s、後ろ 2.0 s の領域のみを切り出してエアロゾルの計測を行い、バックグラウンドのエアロゾルの影響を減らした。以上をもとに、画像情報から以下のように計算した：

$$C_{int} = N/V. \quad (1-10)$$

$C_{int}$  [P/cc]: エアロゾル濃度

$N$  [N]: 粒子数

$V$  [cc]: 気泡体積

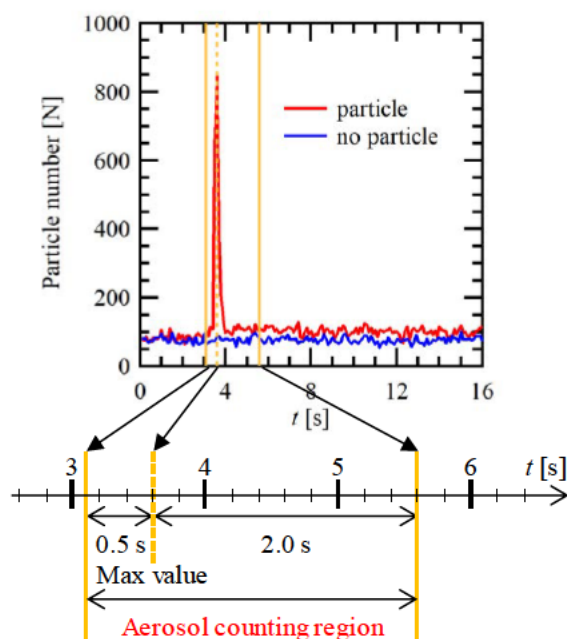


図 1.16 水面におけるエアロゾル濃度の計測結果

図 1.15 の可視化結果と図 1.16 のエアロゾル計測の結果を対応付けるため、図 1.13 に示す装置を用いて気泡画像とエアロゾル個数の同時計測を行うことでエアロゾル濃度と輝度値の相関をとった。本研究においては輝度情報のデータ処理手法を検討するために以下の式のように無次元化輝度を定義した。

$$L = 1 - l_{in}/l_{back} \quad (1-11)$$

ここで、 $L$ は無次元輝度、 $l_{in}$ は気泡内部の輝度情報の平均値、 $l_{back}$ は画像の背景における輝度情報の平均値を示す。 $l_{in}$ および $l_{back}$ の定義を図 1.17 に示す。無次元化輝度について気泡画像の背景差分の有無および輝度値の抽出領域を変えて4通りの条件で計測した。抽出領域の計測結果を図 1.18 に示す。各プロットが計測された無次元化輝度とエアロゾル濃度の関係式、実線が計測結果の線形フィッティングの結果、点線が標準偏差を示す。手法ごとの標準偏差に着目すると、特に $l_{in}$ については気泡の内部の情報全てを用い、背景差分をしなかった図 1.18 (a)の条件において最も標準偏差が小さい結果が得られた。以上をもとに、図 1.18 (a)で用いた手法を用いて以降はデータ処理を行う。

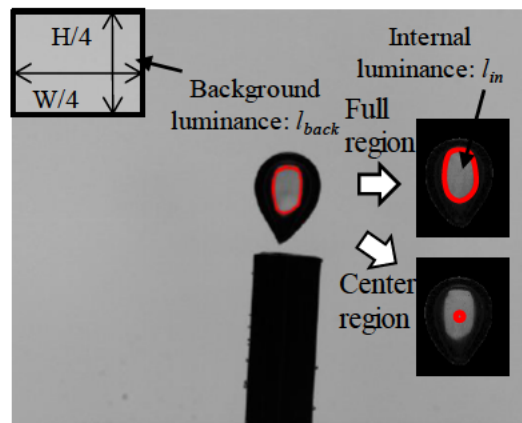


図 1.17 本計測で行ったデータ処理の定義



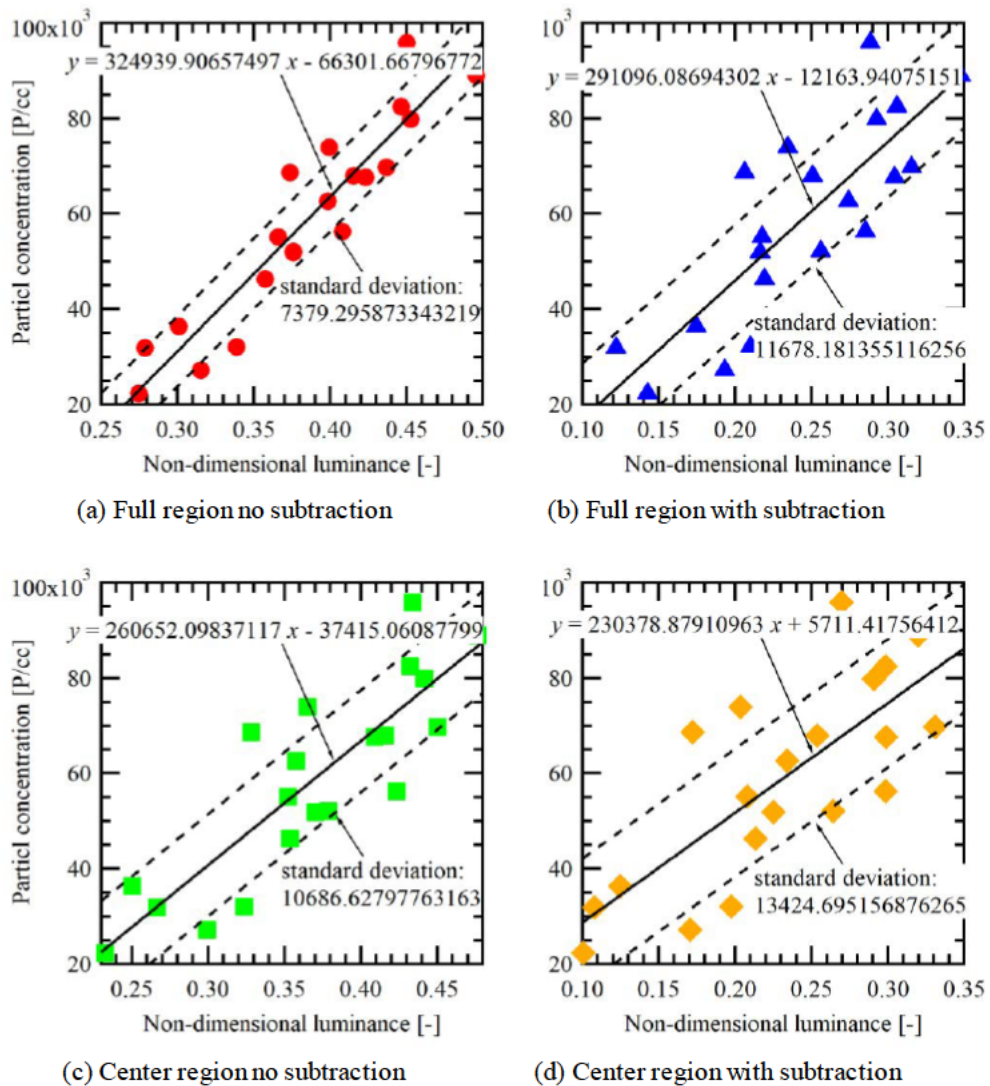


図 1.18 画像処理手法ごとの無次元輝度と気泡内エアロゾル濃度の関係

以上の計測手法をもとに、グリセリン粒子あり、CsI 粒子あり条件で気泡径ごとの無次元輝度と気泡内エアロゾル濃度の関係を計測した結果を図 1.19 に示す。図の赤いプロットが実験より得られた計測点、実線が計測点を最小二乗法によりフィッティングした結果、点線が標準偏差をそれぞれ表す。実験結果から得られた無次元輝度と気泡内エアロゾル濃度の相関式は以下のとおりである：

$$\begin{aligned}
 \text{グリセリン粒子条件: } C_{int} &= 266636L^* - 40586 \pm 4956 \\
 \text{CsI 粒子条件: } C_{int} &= 845638L^* - 151882 \pm 10342
 \end{aligned}
 \tag{1-12}$$

計測結果より、特にグリセリン粒子を使用した条件において特に標準偏差が小さく、良いフィッティングが得られた。これは、図 1.15 (b)の可視化結果からも分かるようにグリセリ

ン粒子は特に気泡内部における輝度の変化が大きく、画像処理の際のダイナミックレンジが確保できたからと考えられる。一方で、図 1.15 (c)の可視化結果からは粒子なしの状態とほぼ変化のなかった CsI 条件においても濃度と可視化結果の明らかな相関がみられた。このことから、本研究においては可視化結果を用いることで気泡の内部における微粒子濃度を予測することに成功したと考えられる。以降は画像処理情報をもとに気泡内部における処理エアロゾル濃度  $C_{int}$  を予想することとする。

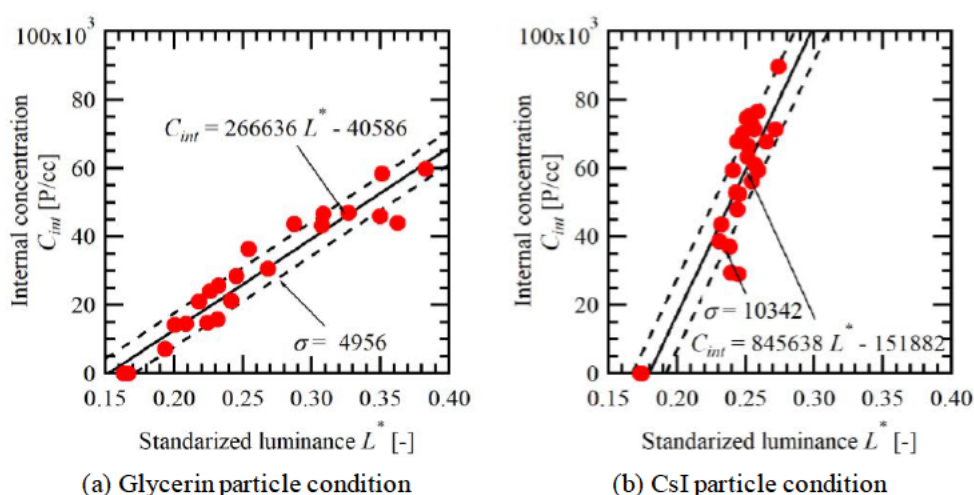


図 1.19 本実験で使用した粒子ごとの無次元輝度とエアロゾル濃度の関係

### 1.2.2. 単一気泡における DF の計測

図 1.20 に単一気泡の DF を計測するための装置を示す。装置の構成は図 1.13 のエアロゾル初期濃度  $C_{int}$  を計測するための装置と同様であるが、本計測においてはノズルを基準としたサブマージェンスを 4 条件 ( $z = 230, 430, 630, 830$  mm) で変化させ、水面に設置したノズルを用いてエアロゾルを捕集し、エアロゾルスペクトロメータを用いてエアロゾル個数および粒径分布を計測した。以上をもとに各サブマージェンスにおける出口エアロゾル濃度  $C_{ext}$  を計測することとした。また、入口エアロゾル濃度  $C_{int}$  についてはノズル直上で気泡をハイスピードカメラにより撮影し、図 1.17 の画像処理結果から無次元化輝度  $L^*$  を算出し、式(1-12)に代入することで計測した。図 1.13 の計測においては画像処理情報と気泡内部のエアロゾル濃度を対応付けるためにサブマージェンスが極めて低い特にエアロゾル濃度 ( $z = 30$  mm) を使用することとした。以上をもとに、入口エアロゾル濃度の計測地点を基準とした各サブマージェンス  $z^*$  ( $z^* = 200, 400, 600, 800$  mm) において入口エアロゾル濃度および出口エアロゾル濃度を計測した結果を図 1.21 に示す。プロットが各サブマージェンスにおける  $C_{int}$  と  $C_{ext}$  の関係を、実線が  $C_{int} = C_{ext}$  の線をそれぞれ示す。計測はレファレンスデータである  $z^* = 0$  mm では 20 回、その他のサブマージェンスでは 10 回ずつ行った。サブマージェンス  $z^* = 800$  mm においては気泡が水面到達直後に破裂しないまま水面に滞留する様子が

計測された。気泡が水面で滞留した場合、気泡上昇時のエアロゾル除去と滞留時のエアロゾル除去を分けることができないため、エアロゾル濃度を計測できる機会が限られた。これにより、グリセリン粒子の条件では計測ができず、CsI 粒子の条件では水面に到達後にすぐに破裂した 3 回の計測のみ行った。気泡が破裂しない理由としては上昇に従って気泡の界面にエアロゾルの成分が堆積していくからと考えられる。計測結果からはサブマージェンスが上昇するとともにエアロゾルの濃度が薄くなっていく傾向がグリセリン粒子および CsI 粒子の両方で得られた。CsI 粒子の方では全体的に出口エアロゾル濃度  $C_{ext}$  が高い傾向が得られた。

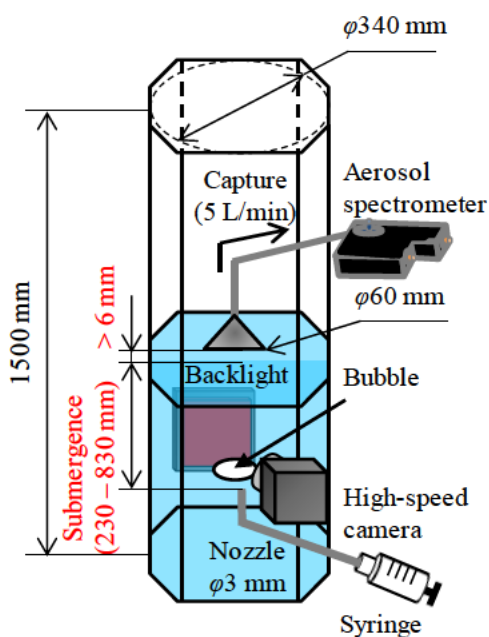


図 1.20 単一気泡の DF 計測に用いた実験装置

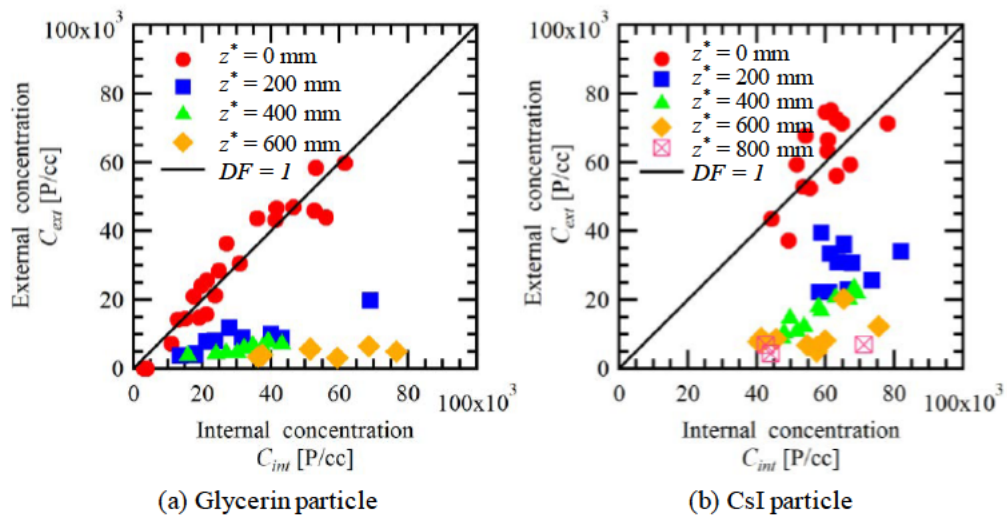


図 1.21 各サブマージェンスで計測された入口および出口エアロゾル濃度

図 1.21 の計測結果をもとに、以下の式を用いて各単一気泡のエアロゾル個数ベースの DF を以下のように計算した:

$$DF = C_{int}/C_{ext} \quad (1-13)$$

$C_{int}$  [P/cc]: 入口エアロゾル濃度

$C_{ext}$  [P/cc]: 出口エアロゾル濃度

計測結果を図 1.22 に示す。赤いプロットがグリセリン粒子の計測結果、白抜きの青いプロットが CsI 粒子の結果である。計測結果からは全体的に CsI 粒子の DF が高い傾向が得られた。DF は計測条件ごとにばらつきがあるものの、大まかに対数軸に対して一定に上昇していく傾向が得られた。これは DF のサブマージェンス依存性を底が e の指数関数にあらわるとした既存研究<sup>[7],[8]</sup>と整合する結果である。

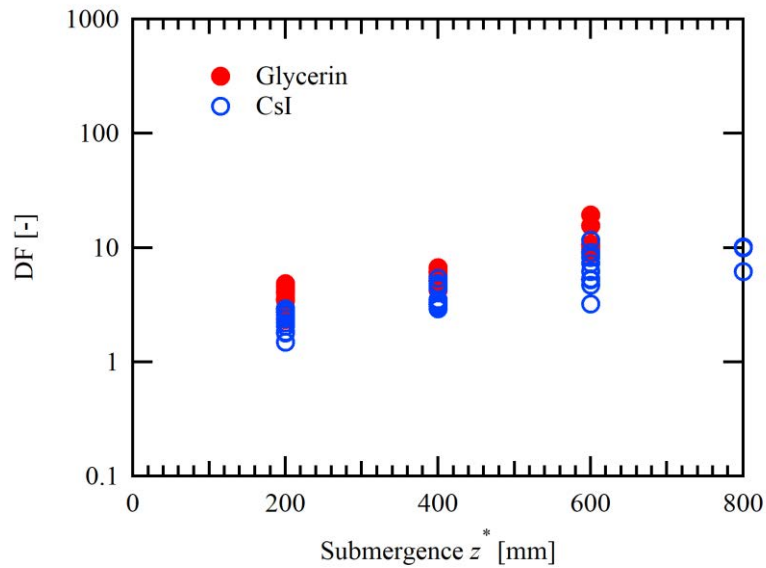


図 1.22 エアロゾル個数ベースの DF

図 1.23 および図 1.24 にグリセリン粒子および CsI 粒子の条件におけるサブマージェンスごとの粒径分布のヒストグラムを示す。また、表 1-3 および表 1-4 にそれぞれ図 1.23 および図 1.24 に対応する入口および出口で計測された微粒子の個数を示す。本計測においては式(1-12)を用いて入口における輝度情報をもとに微粒子濃度を計算しているため、気泡の体積とあわせて微粒子の個数が得られる。入口での微粒子個数が大きく異なるとサブマージェンスごとの微粒子除去量が比較できないため、複数の計測結果の中から初期エアロゾル個数になるべく等しい条件を抽出し、結果をプロットした。計測結果から、特にグリセリン粒子の条件において大粒径の粒子がすぐに水中に移行するとともにほぼ全量除染される傾向が得られた。これは、MELCOR で想定される慣性や重力沈降の影響により微粒子の除染がただちに行われたためと考えられる。また、グリセリン粒子および CsI 粒子条件の両方でサブマージェンスが上がるとともに粒径の最頻値が低粒径にシフトしていく傾向が得られた。さらに、こうサブマージェンスになると微粒子の除去量が全体的に少なくなっていた。以上の結果から、本計測の範囲である  $0.2-1 \mu\text{m}$  の範囲では粒径が大きくなると微粒子の除去量が増加することが分かった。

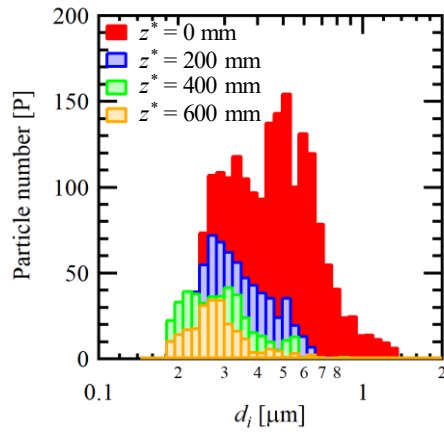


図 1.23 グリセリン粒子条件におけるサブマージェンスごとの粒径分布

表 1-3 グリセリン粒子条件におけるサブマージェンスごとの粒子数

Submergence	Internal particle [P]	External particle [P]
$z^* = 0 \text{ mm}$	1971	
$z^* = 200 \text{ mm}$	2322	663
$z^* = 400 \text{ mm}$	2351	423
$z^* = 600 \text{ mm}$	2408	250

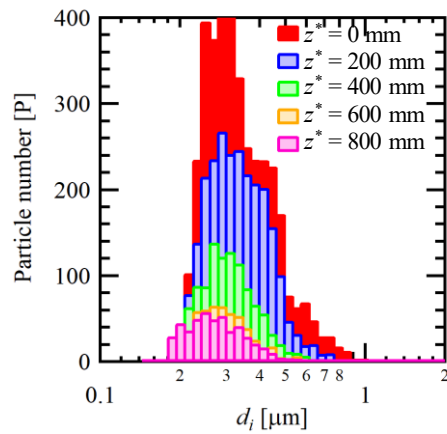


図 1.24 CsI 粒子条件におけるサブマージェンスごとの粒径分布

表 1-4 CsI 粒子条件におけるサブマージェンスごとの粒子数

Submergence	Internal particle [P]	External particle [P]
$z^* = 0$ mm	3767	
$z^* = 200$ mm	3625	2429
$z^* = 400$ mm	3635	1032
$z^* = 600$ mm	3713	511
$z^* = 800$ mm	3015	487

上記の計測結果をもとに質量ベースの DF を計算した。式(1-12)からは微粒子の粒径分布を計算することができないため、図 1.14 に示す初期粒径分布と入口微粒子の個数をもとに、入口粒径分布  $N_{int}$  を算出した。計算結果と水面で計測した微粒子の粒径分布で質量ベースの DF を計算した。

$$DF = \frac{\sum_{d_i} \rho_p N_{int}(d_i) d_i^3}{\sum_{d_i} \rho_p N_{ext}(d_i) d_i^3} \quad (1-14)$$

$d_i$  [m]: 微粒子の粒径

DF [-]: 除染係数

$N_{ext}$  [N]: 出口微粒子の個数

$N_{int}$  [N]: 入口微粒子の個数

$\rho_p$  [kg/m<sup>3</sup>]: 微粒子の密度

計算結果を図 1.25 に示す。赤いプロットはグリセリン粒子、青いプロットは CsI 粒子の結果をそれぞれ示す。計測結果からは、図 1.22 の個数ベースの DF と比較してより大きな値をとることが示された。これは、特に大粒径の粒子の除染量が多いことを示唆している。また、個数ベースの DF と同様にサブマージェンスごとの質量ベースの DF が対数軸に対して一定に上昇していく傾向が得られた。DF の計測結果からグリセリン粒子の方が CsI 粒子と比較して DF の値が大きい傾向が得られた。これは、グリセリン粒子の方が大粒径粒子の成分が大きいからと考えられる。一方で、グリセリン粒子と CsI 粒子のサブマージェンスに対する DF の増加量の差が小さかった。これは、大粒径のグリセリン粒子が入口直後でほぼ全量除染された図 1.23 の結果に対応している。

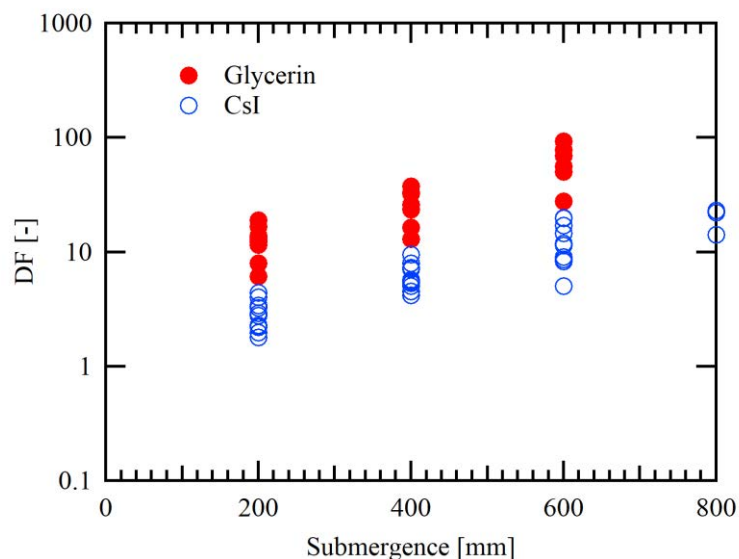


図 1.25 エアロゾル質量ベースの DF

本計測から得られた DF を，既存研究と比較した結果を図 1.26 に示す．本研究で計測した DF のうちグリセリン粒子が赤丸のプロット，CsI 粒子が青丸のプロットでそれぞれ示されている．これに対して GE で実施された単一気泡に対する DF の計測結果<sup>[6]</sup>が青四角のプロットで，既存の大規模 DF 試験の結果の一例として POSEIDON2 の DF 計測結果<sup>[8]</sup>を緑の三角で示す．計測結果から本研究の計測結果は GE の計測結果と比較して全体的に低い DF の値が得られた．これは，GE の実験が入口エアロゾル濃度の計測を行う際に気泡内部ではなく気泡を注入するための循環流路の内部におけるエアロゾル濃度を気泡内の入口エアロゾル濃度と仮定していたため，気泡を射出するためのオリフィスにおけるエアロゾルの損失を十分に考慮できず，エアロゾル濃度を過大に評価していたためと考えられる．一方で，POSEIDON2 の実験結果よりも DF が高くなる傾向が得られた．POSEIDON2 実験においては二相流での DF を評価しているため，気泡と液相の相対速度のほかに気泡の浮力による液相流動が印加されることで除染時間が減少したことで単一気泡の DF よりも低い値が観測されたと考えられる．



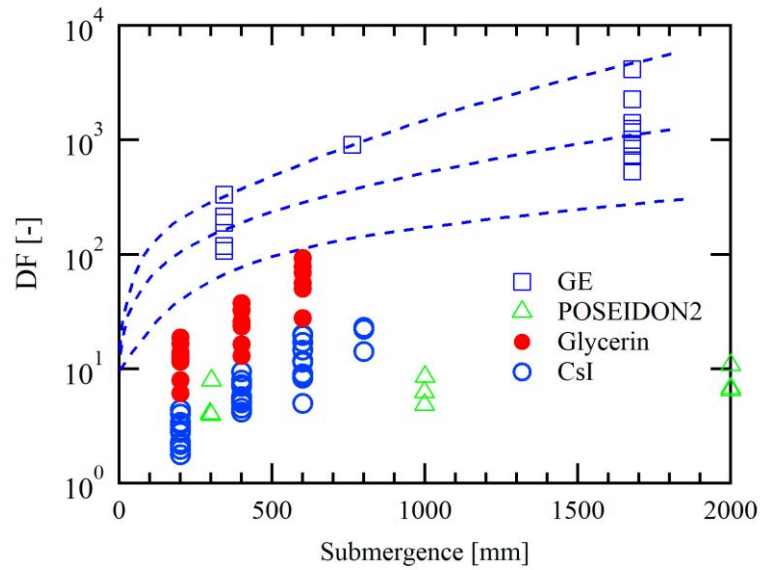


図 1.26 DF 計測結果と既存の研究の比較

### 1.3. 気泡周囲の流動場における濃度分布計測

#### 1.3.1. 実験装置の設備・整備

本実験においては、微粒子を含む気泡に対して干渉計を用いて計測を行うことで、位相の情報をもとに、気泡周囲の流動場における濃度分布を計測した。本研究を用いた干渉計の光路図を図 1.27 に示す。昨年度までの研究においては太字で示すレーザー、プリズム、干渉縞調整機構、光路長補正機構のパーツの 4 つがボトルネックとなっており、干渉計の視野を十分に確保することができないという問題があった。図 1.28 に Clift 線図<sup>[9]</sup>と呼ばれる  $Re$  数,  $Eo$  数,  $Mo$  数の三つの無次元数を用いて気泡が上昇する際の挙動や形状を評価した結果を示す。昨年度までに計測した青丸で示す通り、より球形 (**spherical**) に近く、揺動や変形が生じにくい形状であった。気泡の揺動の影響をより明瞭に観察するためにはより揺動の大きな **spherical cap** に近い領域の気泡を計測する必要がある。そこで、本年度の計測では赤丸で示す領域である等価直径 6.5 mm の気泡の計測を可能とすることとした。そのために、前記の 4 つのパーツを改良しこれまでの二倍の視野を実現することとした。同時に、計測の再現性を確保するためにレーザーの出力を計測するレーザーパワーメーターおよび LED の発光強度を計測する照度計を整備した。

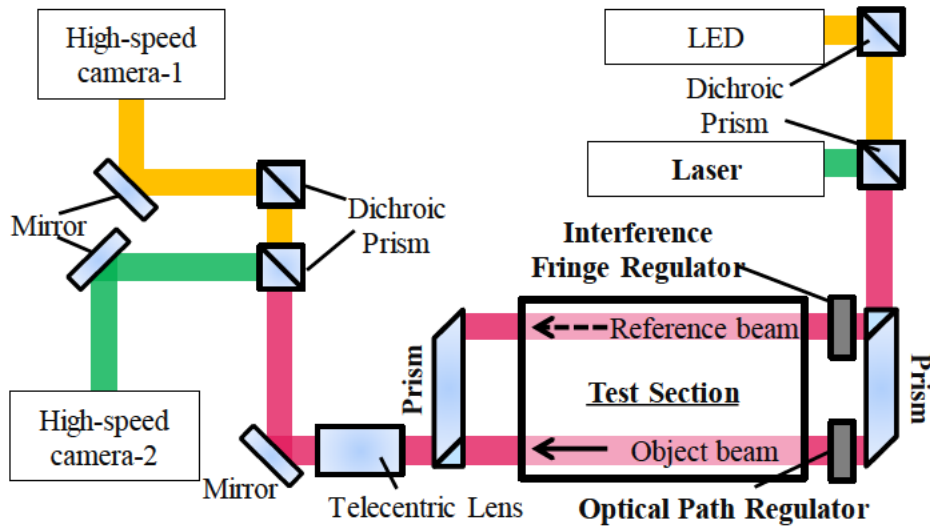


図 1.27 気泡界面およびその周囲における濃度場計測に用いた実験装置

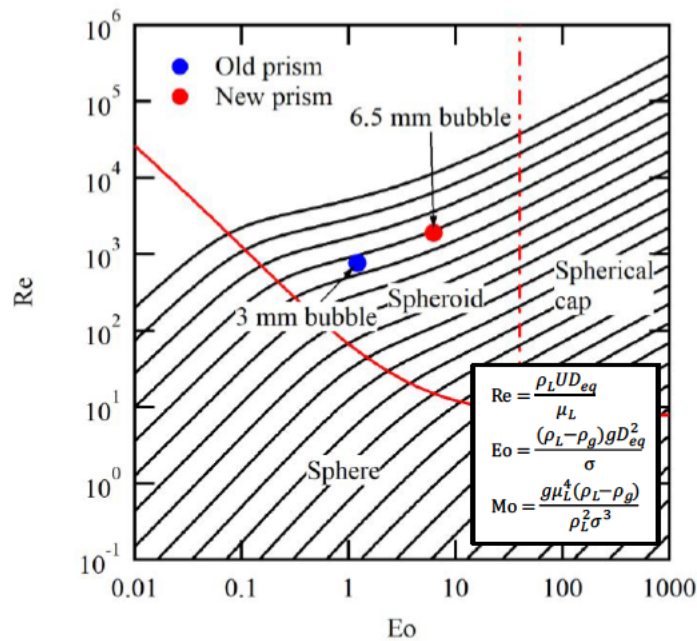


図 1.28 新旧プリズムによる計測範囲の比較

本年度設備した干渉計用部品およびその調整の様子を図 1.29 に示す。本研究においてはこれまでの 15 mm 角のプリズムに対して、偏向型の干渉計としては世界で初となる 30 mm 角のプリズムを用いて干渉縞計測のプリズムを作成し、干渉縞調整機構や光路長補正機構についても同様の光束径に対応した部品に換装した。また、干渉計としての精度を担保するためにアラインメントも行った。図 1.30 に新旧プリズムで計測した視野の比較結果を示す。従来のプリズムの倍のサイズのプリズムを行ったことで、要求性能通り従来の干渉計と比

較して2倍の照野を確保することに成功した.

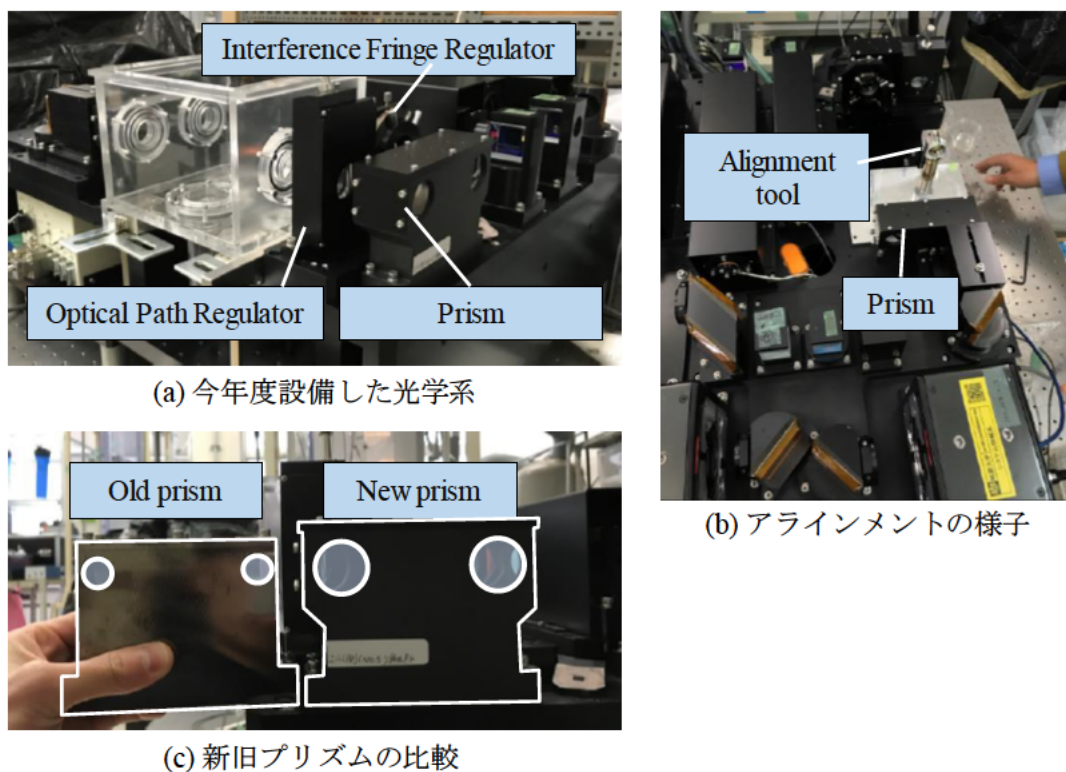


図 1.29 本年度設備した光学部品およびその調整

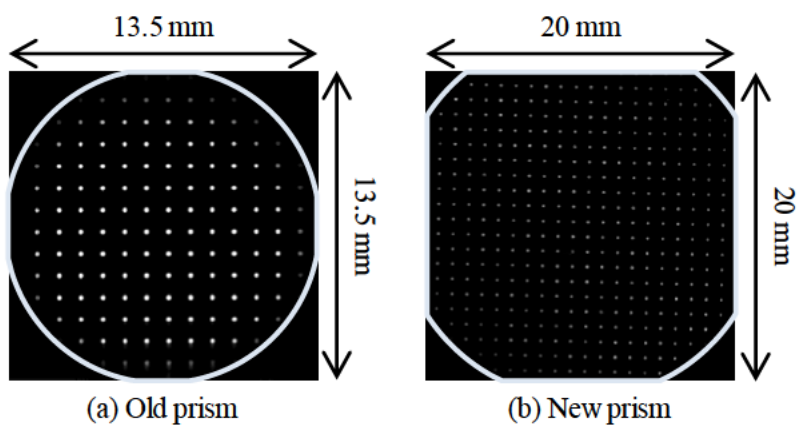


図 1.30 新旧プリズムによる視野の比較

本研究においては気泡の奥行き方向における濃度勾配の影響を可能な限り排除するために実験用の設備を更新するために新たに実験用水槽を設備した。設備した装置を図 1.31 に示す。本水槽は板間の隙間が 4 mm となっており、気泡を三次元の扁球ではなく、二次元の

Taylor bubble として取り扱うことが可能となる。

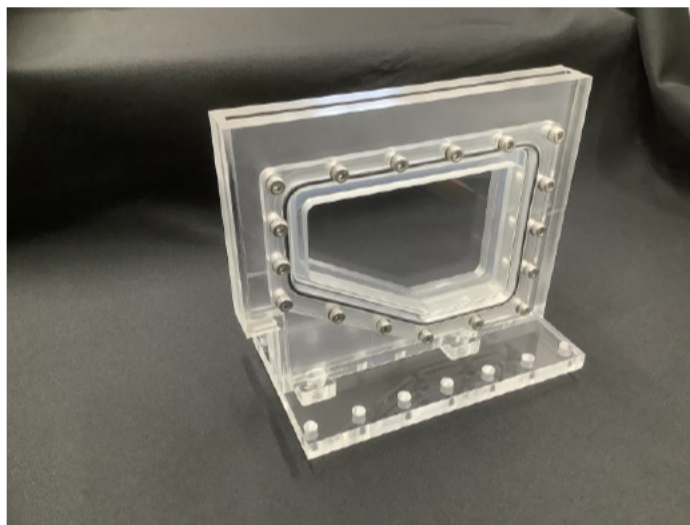


図 1.31 本年度追設した試験用水槽

### 1.3.2. 気泡周囲における濃度場計測手法

本研究においてはハイスピードカメラによる高時間解像度の干渉縞計測を行うため、従来の Kreis ら(1986)<sup>[10]</sup>による干渉縞計測手法を改良し、新たに GMM 法<sup>[11]</sup>を開発した。図 1.32 に画像処理を行うために本研究で使用する干渉計で計測した画像を示す。図 1.32 (a)が気泡の外形を取得するために計測した明視野画像、図 1.32 (b)が気泡周囲の干渉縞画像で、図 1.32 (c)が画面内に密度分布が存在しないときのレファレンス用干渉縞画像である。

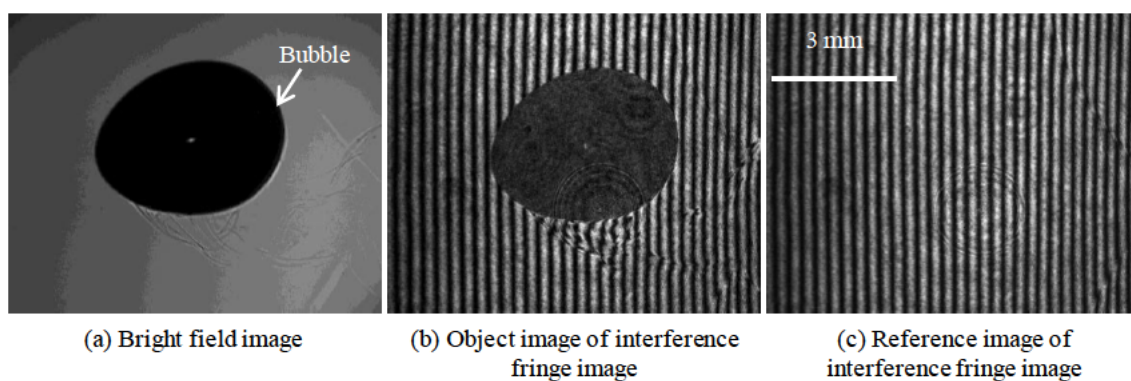


図 1.32 本研究で設備した干渉計を用いて撮影した画像

可視化画像をもとに GMM 法による干渉縞計測を行った。以下に GMM 法の概要を示す。干渉縞を計測した際の画像内の輝度分布を  $i(x,y)$  とすると、干渉計の参照光による複素振幅  $a_r(x,y)$  および物体光の複素振幅  $a_o(x,y)$  を用いて以下のように表される<sup>[12]</sup>。

$$\begin{aligned}
i(x, y) &= |\alpha_r(x, y) + \alpha_o(x, y)| \\
&= \left| \{|\alpha_r(x, y)| \cos(\phi_r(x, y)) + |\alpha_o(x, y)| \cos(\phi_o(x, y))\} + \right. \\
&\quad \left. j\{|\alpha_r(x, y)| \sin(\phi_r(x, y)) + |\alpha_o(x, y)| \sin(\phi_o(x, y))\} \right| \\
&= \alpha_r^2(x, y) + \alpha_o^2(x, y) + 2\alpha_r(x, y)\alpha_o(x, y) \cos\{\phi_r(x, y) - \phi_o(x, y)\}.
\end{aligned} \tag{1-15}$$

ここで、 $\phi_r(x, y)$ が参照光による位相分布で、 $\phi_o(x, y)$ が物体光による位相分布となる。本式のうち、参照光と物体光の位相差を $\theta$ にまとめたうえで、位相情報に関係のある項を、関係のない項をまとめてそれぞれ記述すると、以下のように表される：

$$\begin{aligned}
i(x, y) &= a(x, y) + b(x, y) \cos\{\theta(x, y)\} \\
\theta &= \phi_r - \phi_o
\end{aligned} \tag{1-16}$$

Kreis ら<sup>[10]</sup>により、輝度分布  $i(x, y)$ を FFT 処理することにより、FFT の強度分布  $I(u, v)$ が輝度情報  $A(u, v)$ 、位相情報  $C(u, v)$ 、位相情報の複素共役項  $C^*(u, v)$ の三つを用いて以下のように表されることが示された：

$$I(u, v) = A(u, v) + C(u, v) + C^*(u, v). \tag{1-17}$$

本研究で実際に使用する干渉縞画像に対して FFT 処理を行った結果を以下の図 1.33 に示す。FFT 処理の全体の結果を図 1.33 (a)、 $v=0$  断面における位相分布を図 1.33 (b)にそれぞれ示す。図から分かるように、位相情報は 3 つのピークを持つようなグラフとなる。ここで、仮に位相の変化が干渉縞の変化量と比較して十分に小さいと仮定すると、一番右側の山が位相情報  $C(u, v)$ に対応する。ここで、図 1.32 (b)および図 1.32 (c)の位相情報をそれぞれ取り出し、逆 FFT を行うと、位相情報は以下のように表される：

$$\begin{aligned}
\theta(x, y) &= \arctan \frac{Re c_1(x, y)}{Im c_1(x, y)} \\
\phi_r(x, y) &= \arctan \frac{Re c_2(x, y)}{Im c_2(x, y)}.
\end{aligned} \tag{1-18}$$

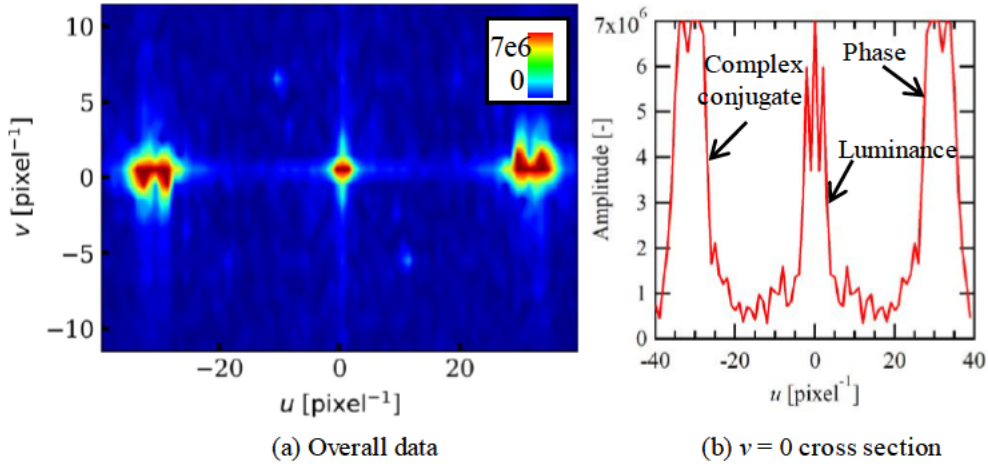


図 1.33 干渉縞画像の FFT 結果

以上の干渉縞の計測画像をもとに、参照光による位相情報  $\phi_o(x, y)$  のみを抽出するためには式(1-16)に式(1-18)を代入し、タンジェントの加法定理を用いて以下のように計算を行う:

$$\phi_o = \arctan \frac{\text{Re } c_2(x, y)}{\text{Im } c_2(x, y)} - \arctan \frac{\text{Re } c_1(x, y)}{\text{Im } c_1(x, y)} \quad (1-19)$$

しかしながら、本手法には式(1-17)のように干渉縞画像から一度位相に関連する情報のみを抽出するという手順を踏む必要がある。通常、干渉縞計測においては画像一枚ごとにこの位相情報を抽出する手順を一つ一つの画像で行う必要があるため、本計測のようなハイスピードカメラ計測に適用することは現実的ではない。そこで、本計測においてはデータクラスタリングの手法の一つである混合ガウスモデル(GMM)を適用して干渉縞計測を行う手法を開発した。GMM とは、離散的なデータ点を複数のガウス分布の重ね合わせとして記述するためのモデルである。本手法において使用する二次元のガウス分布  $N$  は共分散分散行列  $\Sigma$  および平均値  $\mu$  を用いて以下のように表される:

$$N(u, v | \mu, \Sigma) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^{m/2} \sqrt{|\Sigma|^{1/2}}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} - \mu \right\}^T \Sigma^{-1} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} - \mu \right\}. \quad (1-20)$$

さらに、領域内で計測された複数のガウス分布の重みを  $\pi$  として、混合モデルの確率密度関数  $p$  は以下のように表される:

$$p(u, v) = \sum_{k=1}^n \pi_k N(u, v | \mu_k, \Sigma_k). \quad (1-21)$$

GMM においては、これら離散化された点をもとに、E-M アルゴリズムを用いて反復的に値を計算し、ガウシアン分布のパラメータを決定する。図 1.33 に示す FFT の結果を離散化したデータを図 1.34 に示す。これらのデータに対して GMM でクラスタリングを行った結果の  $v=0$  断面を図 1.35 (a) に示す。ここで、図 1.33 (b) の結果と比較して、GMM により FFT した値の三つのピークを良好に分離できていることが分かる。さらに、以上のデータのうち、干渉縞画像全体に対する位相情報  $C(u, v)$  に対応する一番右側のピークのデータの割合  $f(u, v)$  は以下のように表される:

$$f(u, v) = \pi_K N(u, v | \mu_K, \Sigma_K) / p(u, v). \quad (1-22)$$

$f(u, v)$  の計算結果を図 1.35 (b) に示す。本データをフィルターとして輝度情報の FFT 結果全体にかけ合わせることで、位相情報の値  $C(u, v)$  は以下のように表される:

$$C(u, v) = I \times f(u, v). \quad (1-23)$$

図 1.36 に GMM を用いて抽出した位相結果の  $v=0$  断面を図 1.36 に示す。図 1.33 (b) の FFT 結果の  $v=0$  断面と比較して良好な抽出ができていることが分かる。本手法を用いた位相情報の抽出手法を以降は GMM 法と呼ぶ。GMM 法により、FFT 法の課題であった FFT データからの位相情報の抽出自動化に成功した。

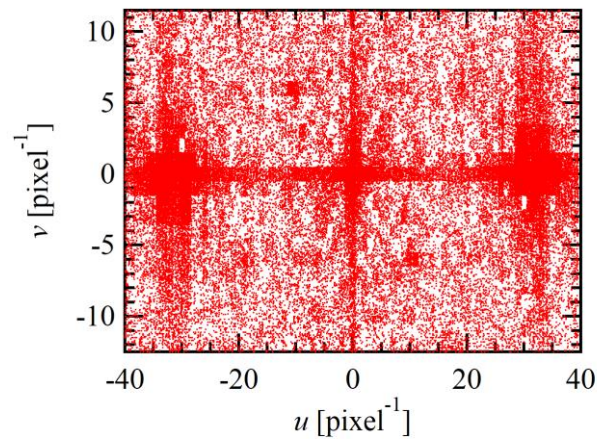


図 1.34 干渉縞画像の離散化結果

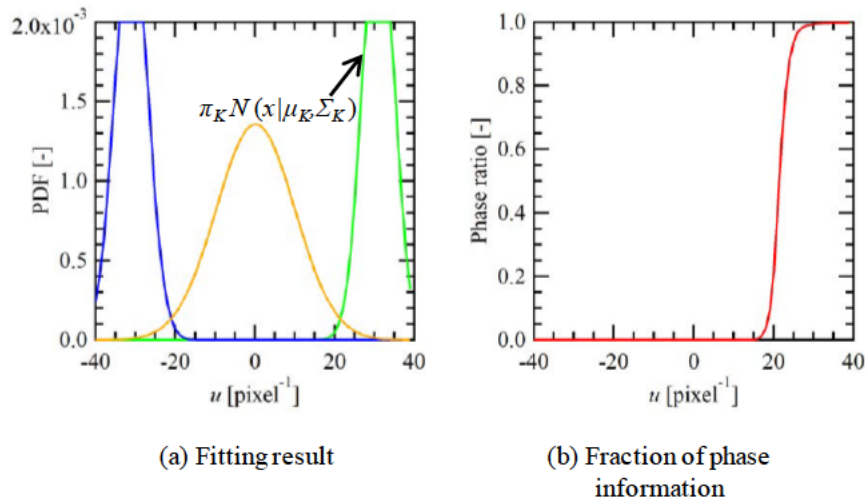


図 1.35 GMM による理クラスタリングおよびフィルターの作成結果

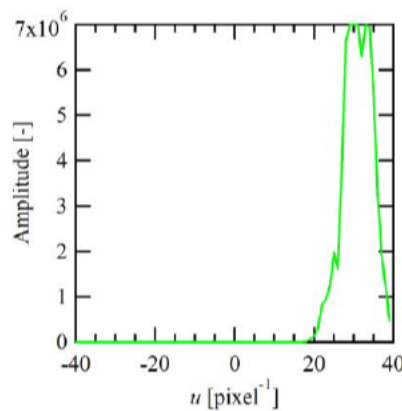
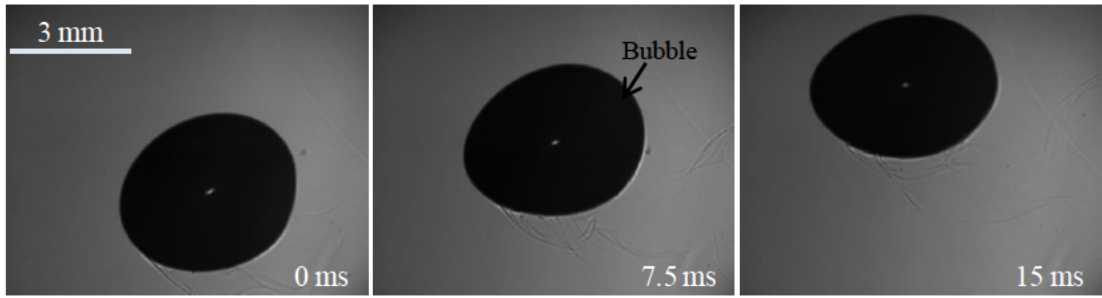


図 1.36 GMM 法により抽出された位相情報

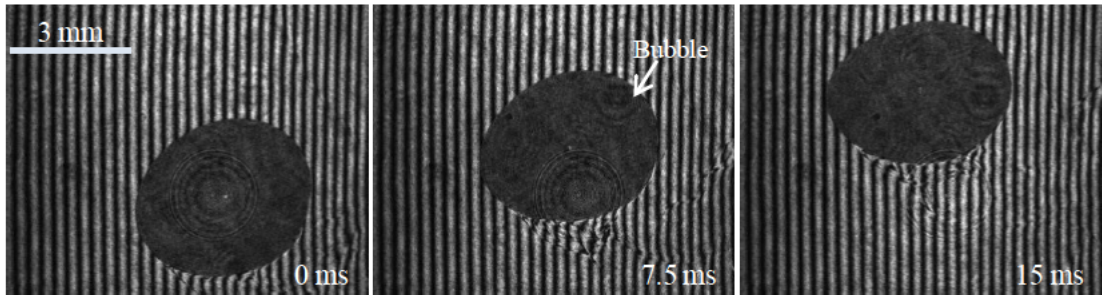
### 1.3.3. 気泡周囲における濃度場計測結果

GMM 法を用いてハイスピードカメラ計測による時系列データの計測を行った。図 1.37 に従来のプリズムを用いて気泡周囲の位相場計測を行った結果を示す。上昇する気泡を撮影した画像を図 1.37 (a)に示す。気泡の等価直径は 3 mm 程度であるため、気泡自体の揺動や変形は大きく見られない。気泡の下部からは濃度勾配の変化によるものとみられる黒い筋が確認できた。干渉縞の画像を図 1.37 (b), 位相場のデータ処理を行った結果を図 1.37 (c) にそれぞれ示す。計測結果からは気泡の上昇に応じて気泡の下部において微粒子の濃度が高い領域が存在していることが分かる。特に気泡の下面において微粒子の濃度が高い領域が存在し、気泡の上昇とともに濃度が高い領域も上昇していく様子が見られた。

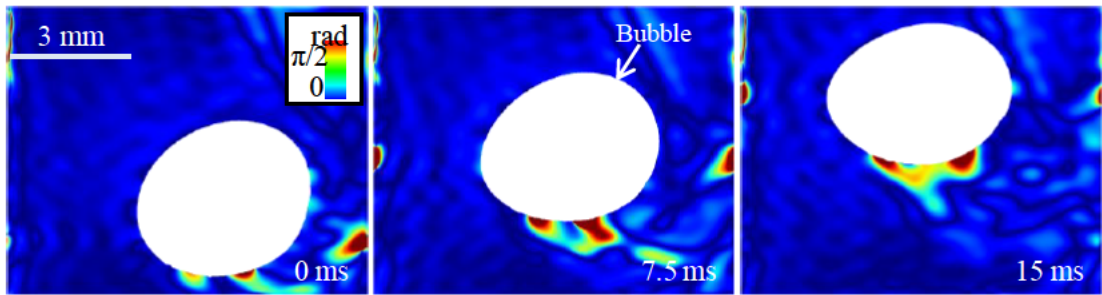




(a) Bright field visualization result (frame rate: 4000 fps, shutter speed: 1/4000 s, resolution: 1280 × 1024 pixels)



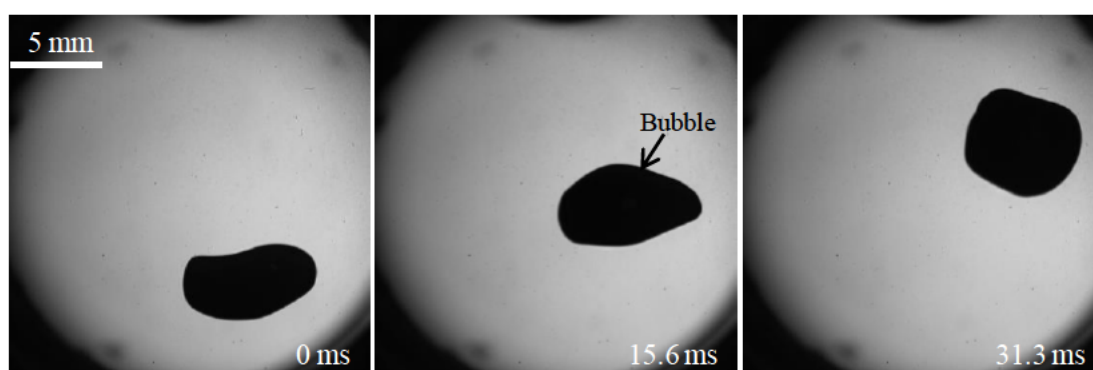
(b) Interference fringe visualization result (frame rate: 4000 fps, shutter speed: 1/4000 s, resolution: 1280 × 1024 pixels)



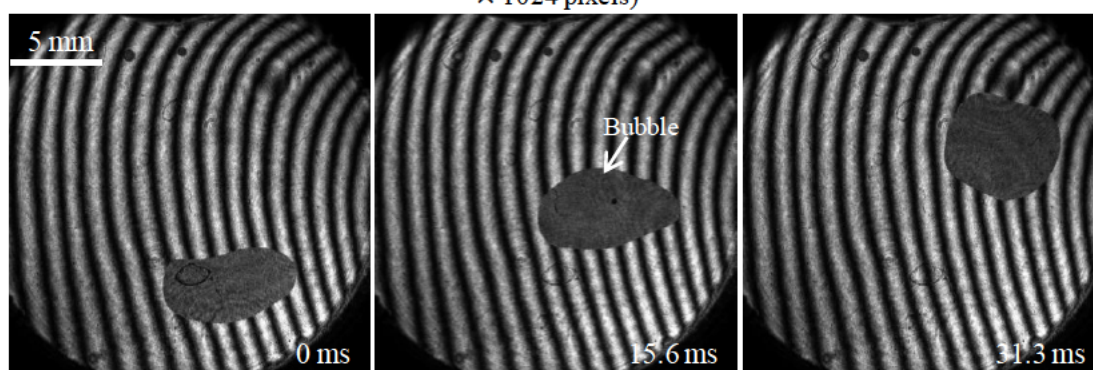
(c) Time-series data of particle decontamination behavior

図 1.37 旧プリズムによる等価直径 3 mm の気泡に対する可視化計測結果

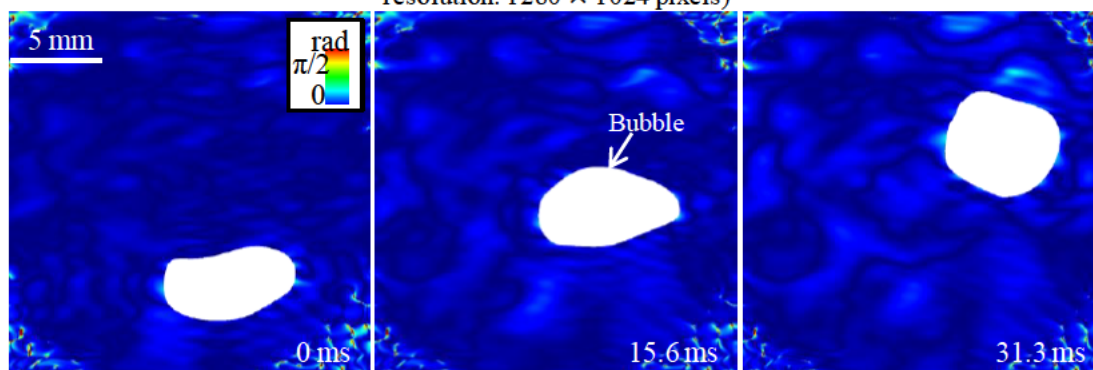
図 1.38 に今年度整備した新プリズムを用いて気泡を撮影した結果を示す。図 1.38 (a)が上昇する気泡を撮影した結果である。図 1.37 (a)と比較して気泡形状が上昇とともに大きく変化していく様子が見られた。図 1.38 (b)に干渉縞の画像、図 1.38 (c)に干渉縞計測結果を示す。計測結果からは図 1.37 (c)のように一貫した傾向はみられず、気泡の上昇に合わせて気泡周囲の位相場が複雑に変化していく様子が見られた。これは、気泡の形状が変化することで重力沈降以外の微粒子除染因子が卓越していることおよび気泡自体の三次元回転の影響で観測地点が複雑に変化していることが原因と考えられる。



(a) Bright field visualization result (frame rate: 6400 fps, shutter speed: 1/6400 s, resolution: 1280 × 1024 pixels)



(b) Interference fringe visualization result (frame rate: 4000 fps, shutter speed: 1/400000 s, resolution: 1280 × 1024 pixels)



(c) Time-series data of particle decontamination behavior

図 1.38 新プリズムによる等価直径 6.5 mm の気泡に対する可視化計測結果

### 1.3.4. 気泡界面における濃度場計測結果

気泡周囲の除染現象についてより定量的に評価するために気泡の界面における微粒子の除染現象を抽出し、比較を行った。図 1.39 に気泡界面における極座標情報の定義を示す。本計測においては気泡の傾きを考慮した位相情報を抽出するために気泡の楕円フィッティングから傾き角を計測し、界面における極座標分布  $\theta$  を以下のように定義した:

$$\theta_{shape} = \theta_{gravity} + \theta_{tilt}. \quad (1-24)$$

$\theta_{gravity}$  [rad]: 重力方向を原点とした偏角

$\theta_{shape}$  [rad]: 気泡形状の傾きを考慮した偏角

$\theta_{tilt}$  [rad]: 気泡の重力方向からの傾き角

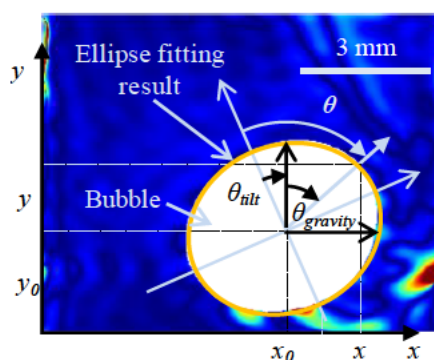


図 1.39 気泡界面における極座標の定義

等価直径 3 mm および 6 mm の気泡周囲における位相分布計測結果をそれぞれ図 1.40 および図 1.41 に示す。計測結果の比較からは、等価直径 3 mm の気泡においては気泡の下部における微粒子の除染がどの時間においても支配的である一方で、等価直径 6 mm の気泡においては気泡の界面全体から微粒子の除染が生じていることが分かる。特に、気泡の長辺付近においては一貫して高い値をとっており、気泡の扁平などの影響がみられた。

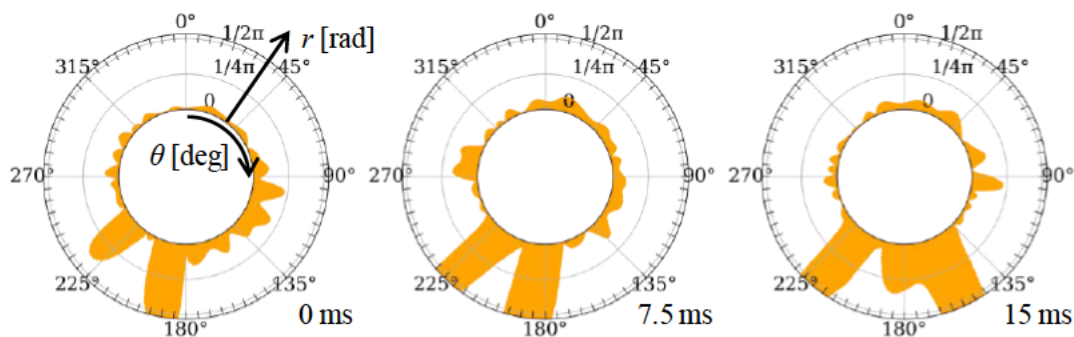


図 1.40 旧プリズムによる等価直径 3 mm の気泡界面における位相分布

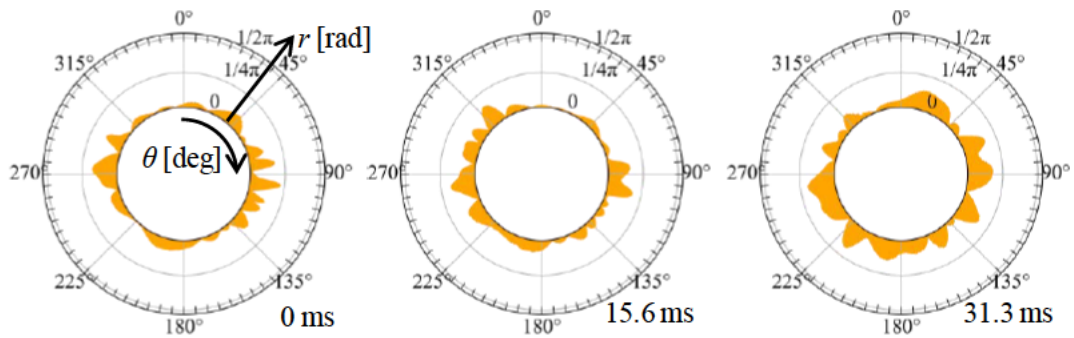


図 1.41 新プリズムによる等価直径 6.5 mm の気泡界面における位相分布

気泡の界面における微粒子濃度の拡散現象についてより詳細に計測するために気泡の界面付近における微粒子濃度分布を計測した。図 1.42 に濃度分布計測の計測点の定義を示す。本計測においては気泡の傾きを考慮した短辺軸上の二点(North, South)および長辺軸上の二点(East, West)の計 4 つの点から延びる垂線軸上について 0.02 mm 間隔で 50 点を抽出し、気泡が画面内で計測された時系列データについて平均化すること気泡の界面における微粒子濃度分布を計測した。図 1.43 にその位相分布計測結果を示す。計測結果を比較すると、長辺軸上の East, West についてはそれぞれ気泡の界面における微粒子の濃度が高い傾向があり、また、微粒子が遠くまで拡散する様子が見られた。一方で、短辺方向は全体的に界面付近における濃度が小さく、すぐに拡散する様子が見られた。これは、気泡周囲の流動で生じる移流とは逆の傾向を示しており、微粒子の除染が特に気泡の長辺付近において生じていることが類推できる。

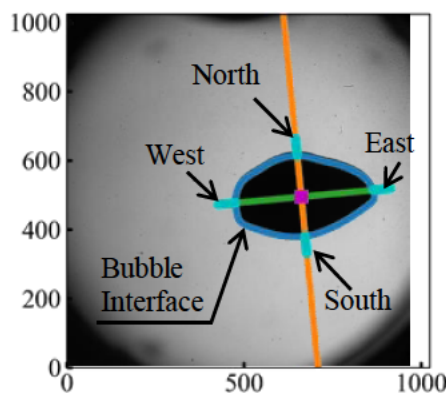


図 1.42 気泡界面における各端点および垂線の定義

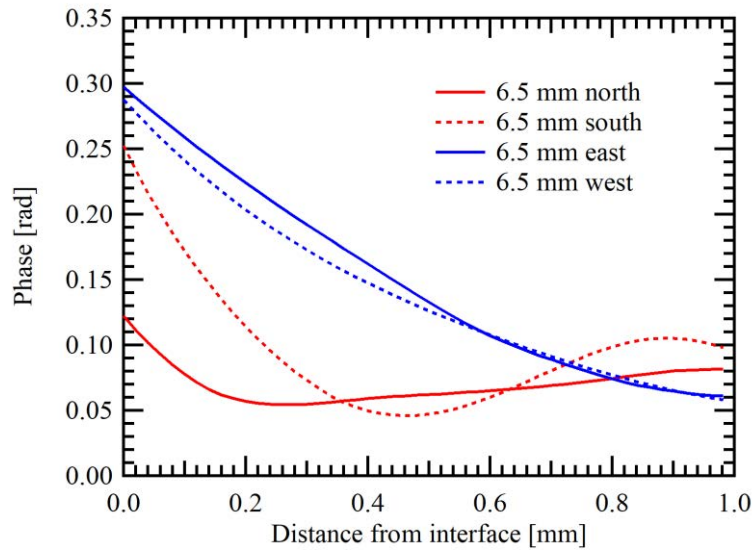
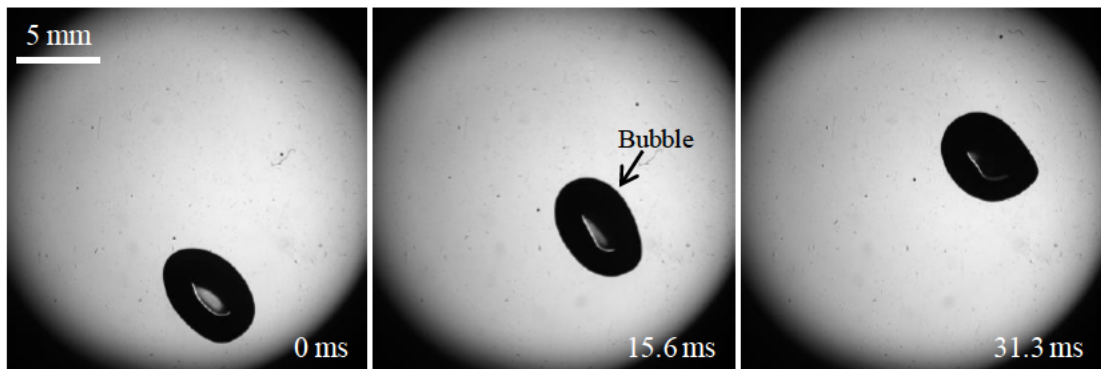


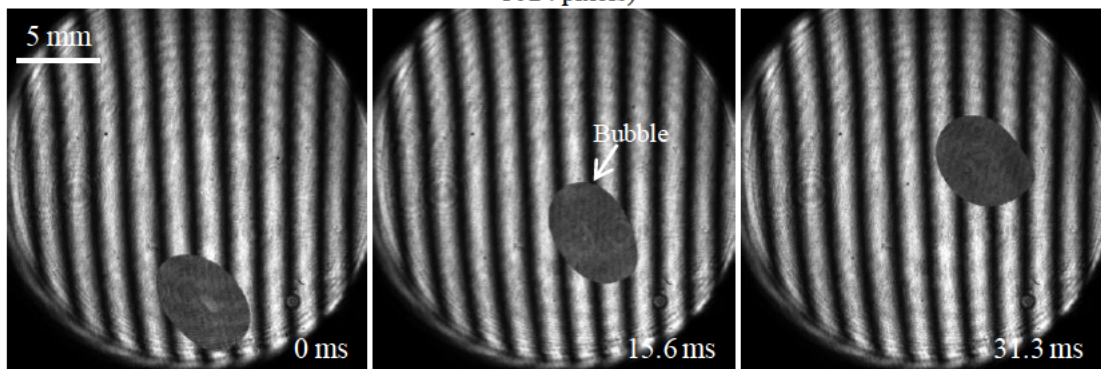
図 1.43 等価直径 6.5 mm の気泡端点から延びる垂線に沿った位相分布

### 1.3.5. 薄型水槽を用いた気泡計測結果

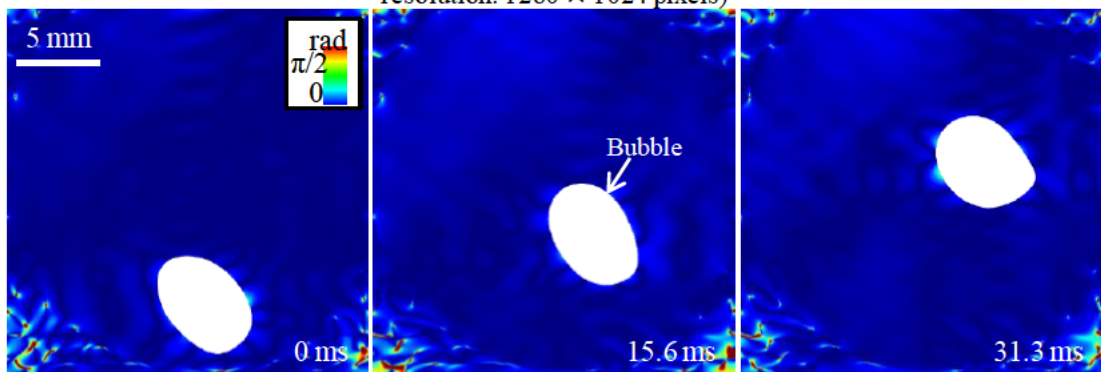
図 1.31 に示す薄型水槽を用いて気泡周囲に計測される濃度場を計測した。図 1.44 (a)が上昇する気泡を撮影した結果である。気泡径は通常の三次元気泡と同様に扁平しながら上昇していく傾向がみられた。一方で、図 1.38 (a)の気泡形状と比較してやや界面形状の変形が小さい傾向がみられる。これは、気泡の前後の界面が水槽界面付近に位置していることが原因と考えられる。図 1.44 (b)に干渉縞の画像、図 1.44 (c)に干渉縞計測結果を示す。計測結果からは図 1.38(c)のように気泡の界面付近のごく近傍で微粒子による濃度場が得られた。しかしながら、気泡形状の変形が小さいことで濃度場自体の時間変化は小さい図 1.45 に薄型水槽による計測結果をもとに得られた気泡周囲における位相分布計測結果を示す。図 1.41 の計測結果と比較してより位相分布の変化が穏やかであることが分かる。これは、図 1.44 (a)に示す可視化結果において気泡形状の変形が小さいことに起因していると考えられる。また、濃度場は気泡全体にわたって高い傾向が得られる。これは、薄型水槽で気泡を発生することで気泡の前後で曲率の高い部分が生じ、微粒子の除染を促進したからと考えられる。



(a) Bright field visualization result (frame rate: 6400 fps, shutter speed: 1/6400 s, resolution: 1280 × 1024 pixels)



(b) Interference fringe visualization result (frame rate: 6400 fps, shutter speed: 1/200000 s, resolution: 1280 × 1024 pixels)



(c) Time-series data of particle decontamination behavior

図 1.44 薄型水槽による気泡に対する可視化計測結果

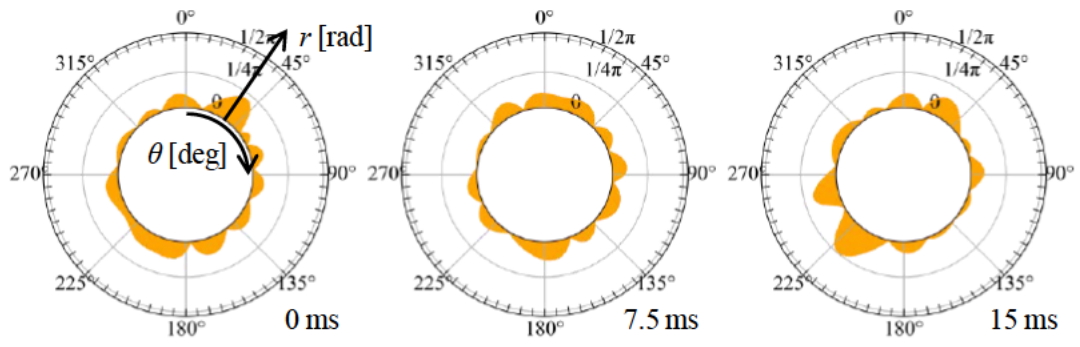


図 1.45 薄型水槽による Taylor bubble の気泡界面における位相分布

## 1.4. 本章の結言

①単一気泡形状の多次元計測: Bain ら(2013)<sup>[2]</sup>による気泡画像の三次元再構成手法を用いてエアロゾルを含む気泡形状の三次元再構成を行った。再構成結果をもとに、空気単相、OX50, BaSO<sub>4</sub>, CsI の4条件で気泡形状の評価を行った。気泡の三次元性を評価することで、気泡の形状が MELCOR における想定と比較して大きな誤差があることを示した。また、気泡自体の振動も大きいことを示した。

②単一気泡におけるエアロゾルの可視化および DF 計測: 画像処理とエアロゾル計測を組み合わせて入口エアロゾル濃度を計測することで気泡内部のエアロゾル濃度を直接評価する手法を開発した。開発した手法をもとに、単一気泡における DF を計測した。単一気泡における DF は大きな粒径依存性がみられた。既存の大規模二相流動試験や単一気泡における DF 計測の結果と解析結果を比較することで、本研究で得られた DF が確からしいことを確認した。

③気泡周囲の流動場における濃度分布計測: 干渉計のプリズムをより大型のものに換装することで、気泡周囲の流動場において従来は不可能であった揺動の大きい気泡周囲の濃度分布の計測を行った。等価直径 6.5 mm 程度の径が大きな気泡では気泡の揺動や変形に伴い、3 mm の小さな気泡と比べてより複雑な除染現象がみられることを示した。また、等価直径 6.5 mm の気泡では特に気泡の側部からの除染が顕著である可能性を示した。



## 2. 気泡の 2 相流挙動測定実験

本研究ではエアロゾルを含んだ 2 相流挙動の把握のため、幅広い条件におけるガス噴出から液面到達までの **break up**, 気泡上昇過程などの気泡挙動を詳細に把握する。さらに流動状況を分類し整理して、特徴的な気泡塊の挙動及びその領域を特定する。図 3 に実験部の概念図を示す。

今年度は、昨年度までに整備した実験装置のボイド率計測装置を改良し、エアロゾルを含んだ非凝縮性ガスと蒸気の混合ガスを対象に、ノズル出口における大気泡形成、気泡の分裂による気泡群形成といった 2 相流動について、凝縮を伴いながら水面に至るまでの流動構造の更なる詳細計測を行う。

また、実験部出入口におけるエアロゾル計測を行うことで除染係数を計測し、ガス流量やサブマージェンス、凝縮性ガスおよび非凝縮性ガスの混合比等のパラメータがエアロゾル除去効果に及ぼす影響を評価する。その際、可溶性を含む様々なエアロゾルを用い、エアロゾル物性による違いも検討する。

さらに、界面変動等に起因するエアロゾル除去効果について、単一気泡実験で整理したパラメータ等を用いて 2 相流動様式に応じたモデル化の方法を検討し、単一気泡を対象に検討したモデル化手法を改良する。

## 2.1. 気泡挙動の把握および整理

### 2.1.1. ボイド率計測装置の改良

本実験ではエアロゾルを混合させた気相を水槽に注入し、気泡の分裂崩壊挙動を計測した。本研究で用いたボイド率計測装置の概要を図 2.1 に示す。本年度は新たにエアロゾル発生器の直後にバッファタンクを設備し、エアロゾル濃度の安定化を図った。また、気相を注入するL字ノズルを改良し、止水性を確保した。また、蒸気混合条件において気相温度の低下による蒸気の凝縮を抑えるために気相加熱器を設備し、配管についても従来のビニールチューブより断熱性の高いフッ素樹脂(PFA)チューブに変更した。さらに、ワイヤメッシュセンサ(WMS)をより空間解像度の高いものに変更し、詳細な気泡の分裂崩壊挙動を計測可能とした。

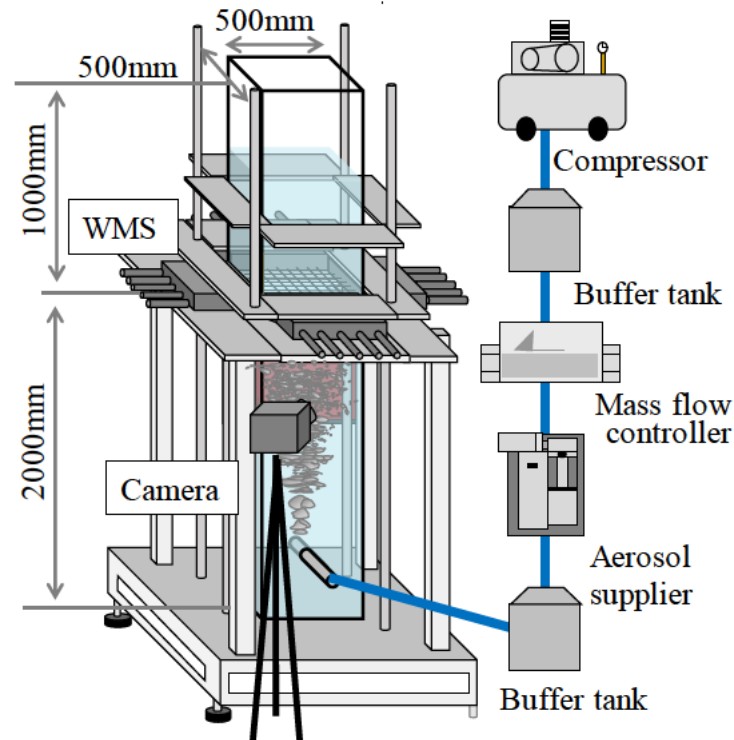


図 2.1 ボイド率計測装置の概要

本年度設備したバッファタンクを図 2.2 に示す。図 2.3 にバッファタンクを用いた場合と用いなかった場合でのインレット部におけるエアロゾル発生器のピストン送り速度とエアロゾル濃度の関係を示す。エアロゾル発生器のピストン送り速度とは、エアロゾル発生器は試料をピストンで押し上げ、ブラシで掻き出し気相と混合させることでエアロゾルを発生させる仕組みとなっており、ピストンの送り速度を変更することでエアロゾルの発生量

を制御することができる仕組みとなっている。しかしながら、ピストンに詰め込む試料のかさ密度の影響などにより、エアロゾルの発生濃度が安定しないことが昨年度までの問題であった。そこで、エアロゾル発生後にバッファタンクを経由することでエアロゾル濃度の安定化を図った。図 2.3 にバッファタンク使用時としない時のピストン送り速度の増加に伴うエアロゾル濃度を示す。図からバッファタンクを経由した場合はエアロゾル濃度が送り速度に対して追従するようになり、エアロゾル濃度が安定した。



図 2.2 本年度に設備したバッファタンクの外観

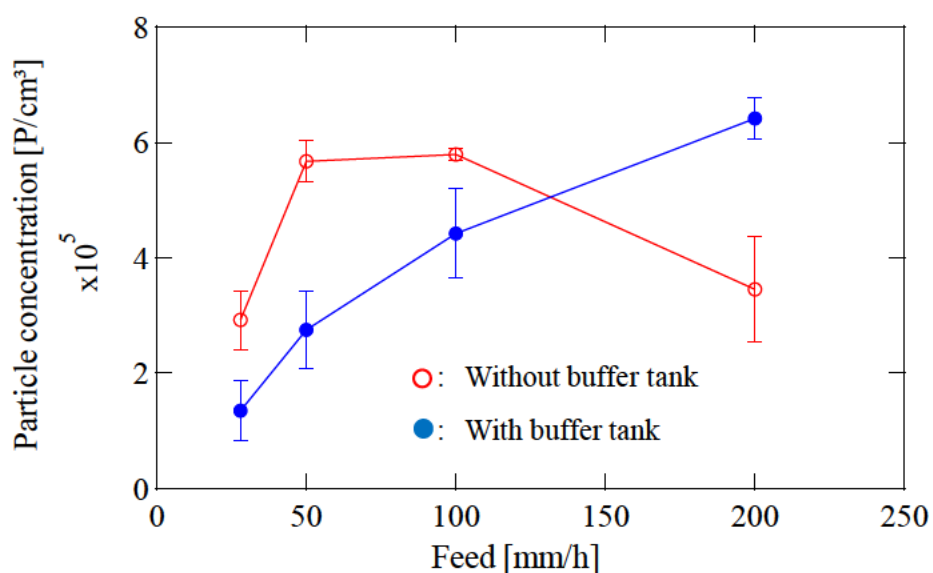


図 2.3 バッファタンクの有無によるエアロゾル濃度計測結果

図 2.4 に昨年度までに設備したノズルと今年度設備したノズルの外観を示す，水槽締め付け部を円盤形のものから六角に変更することで水槽に適切に締め付けることを可能とし，止水性の確保を実現した。



(a) 旧式ノズル



(b) 今年度設備したノズル

図 2.4 本年度設備したノズルと従来ノズルの比較

図 2.5 に気相加熱装置の外観を示す．電熱線によってパイプを加熱し，パイプ内を通る蒸気が混合した気相の温度の低下を抑制する．また蒸気が通過する配管を PFA チューブとすることで断熱性を向上させた．



図 2.5 本年度設備した気相加熱装置の外観

また，高解像度の WMS を設備した．既存の WMS と新型 WMS の仕様を表 2-1 に示す．既存のボイド率計測装置に設置されている WMS をより空間解像度の高いものに変更することでボイド率計測装置を改良する．WMS はワイヤの間隔の約半分のサイズの気泡まで精

度よく検出することが可能である。本研究で昨年度までに設備した既存の WMS では気泡直径 4mm 以下の気泡を検出することが難しい。よって本年度は直径 4mm 以下の気泡が計測可能となるようにメッシュグリッドサイズを 1/2 とすることで、空間分解能を 4 倍にした WMS を設備した。また、空間分解能の増加に伴う装置の大型化に対応するためにメッシュの設置間隔を 10 mm から 14 mm に増大させた。

表 2-1 既存および新型ボイド率計測装置(WMS)の概要

仕様項目	既存の WMS	新型 WMS
サイズ	500 mm×500 mm	500 mm×500 mm
計測点	64×64	128×128
空間分解能	7.81 mm×7.81 mm	3.91 mm×3.91 mm
電極ワイヤ直径	0.3 mm	0.3 mm
メッシュの設置間隔	10 mm	14 mm

設備した WMS の模式図および外観を図 2.6 および図 2.7 に示す。既存の WMS 同様に二層のメッシュによって計測されたボイド率データから気泡を検知し、気相速度を算出することで気泡の再構成を行うことが可能である。WMS は解像度に対して約半分のサイズを持つ気泡を正確に検出する能力があるとされており<sup>[13]</sup>、空間分解能を向上させることで既存の WMS で計測が難しい等価直径 4 mm 以下の気泡を検出することが期待できる。

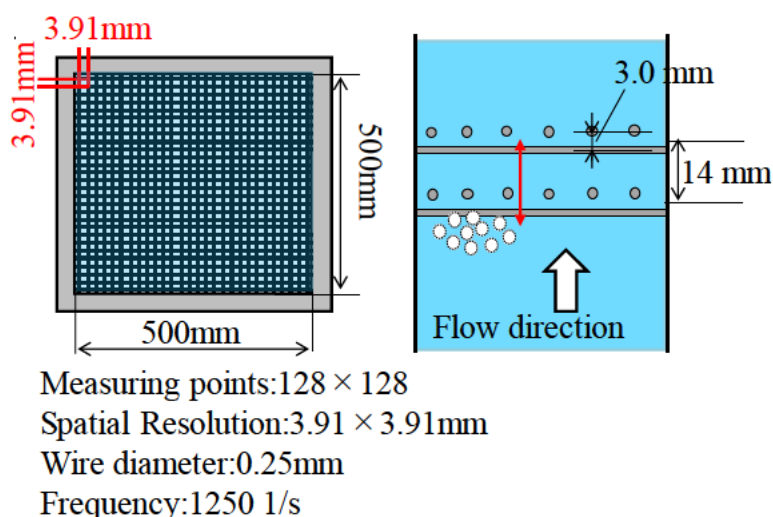


図 2.6 本年度設備した WMS の模式図

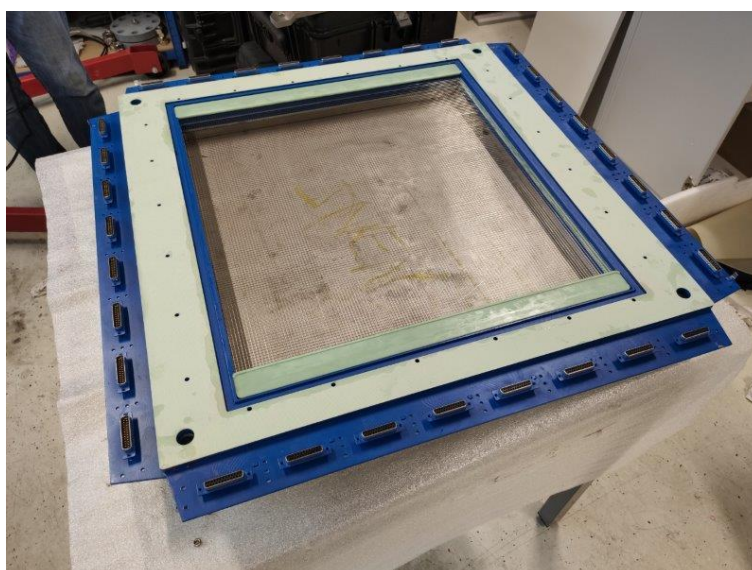


図 2.7 本年度設備した WMS の外観

#### 2.1.2. ボイド率計測実験体系

二相流実験体系を図 2.8 に示す。テストセクションは透明ポリカーボネート製の矩形水槽 (500×500×3000 mm)を用いた。水槽側面にはポートが設けられており、噴射ノズル (上向き L-字,  $\Phi 10$  mm) や熱電対を挿入可能となっている。試験水槽底部から 2000 mm の位置に固定された WMS (Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf 製, Germany) を用いてノズルから噴射された気相流を計測した。また、水槽側面から高速カメラ (FASTCAM Mini UX100, Photron, Inc.) と LED バックライト (LTD-530300, 日進電子製) を用いて流動の可視化撮影を行った。レンズは主に Nikon 社製 AF-S DX Micro-Nikkor 40 mm f/2.8 G を使用した。

プール水は水槽下部から注排水する構造となっている。WMS は水槽に固定されており、ノズル高さと全体の水位を上下に調節することで WMS とノズルの位置を相対的に変化させ、様々な水深における流動計測が可能である。

作動ガスとしては空気および蒸気を使用した。空気はコンプレッサで加圧しバッファタンクに一度蓄えたうえでマスフローコントローラを用いて流量を調節した。空気は気相加熱器 (CLH-0.6, 新熱工業製)で任意の温度に加熱可能である。エアロゾルを混入させる場合のみエアロゾル発生器を通過させ、混入させない場合には別ラインを使用した。蒸気は電気ボイラーで発生させマスフローメータおよびバルブで手動調節した。出口側のエアロゾルを計測する場合はプール水を通過したガスを 5 L/min で吸引しながらエアロゾルスペクトロメータを用いて計測した。

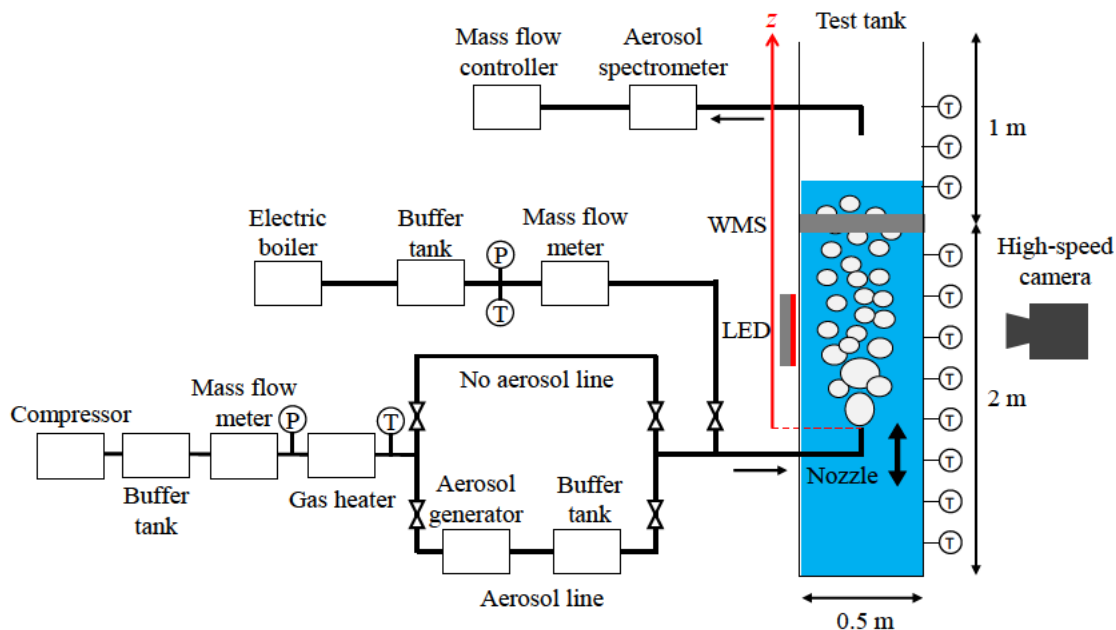


図 2.8 ボイド率計測体系図

主要な実験条件を表 2-2 に示す。実験ごとに気相流量やプール水温，気相温度などの実験パラメータは幅広く変更した。したがって詳細な実験条件については各章に記載する。

表 2-2 主要な実験パラメータ

Pameter	Value
Air flow rate	10-260 L/min
Steam flow rate	0-270 L/min
Nozzle inner diameter	Φ6, Φ10 mm
Water temperature	20-99.9 °C
Air temperature	R.T.-150 °C
Submergence	0-1100 mm
Pressure	Ambient pressure

エアロゾルは乾式分散型のエアロゾル発生器 (RGB2000, Palas)により発生させた。本装置はシリンダ内に試験粒子を入れピストンで下から押し上げ，押し上げられた粒子を回転ブラシで削りとり巻き上げ空気に乗せて分散させる構造となっている。押し上げる速度（フィードレート）を調整することでエアロゾル濃度を調整可能である。広範な濃度範囲で設定可

能で，様々な種類の粒子を使用可能である。

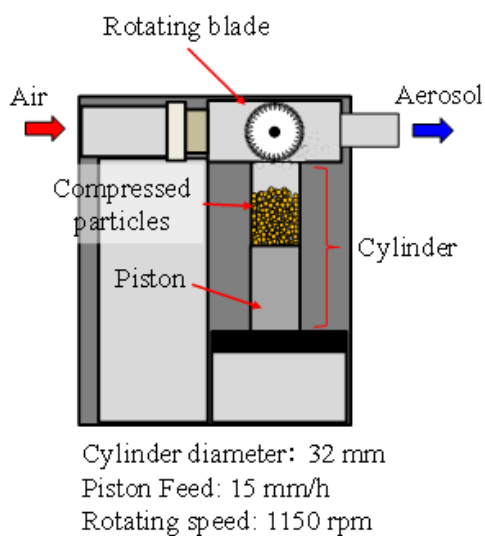


図 2.9 エアロゾル発生器模式図

ガスにより輸送されプール水面領域で空間中に放出されるエアロゾルの挙動を高速度カメラにより可視化した。水槽背面に黒色バックシートを設け，水槽側面前方から白色ライトを当て，エアロゾルが空間を漂う挙動を可視化した。



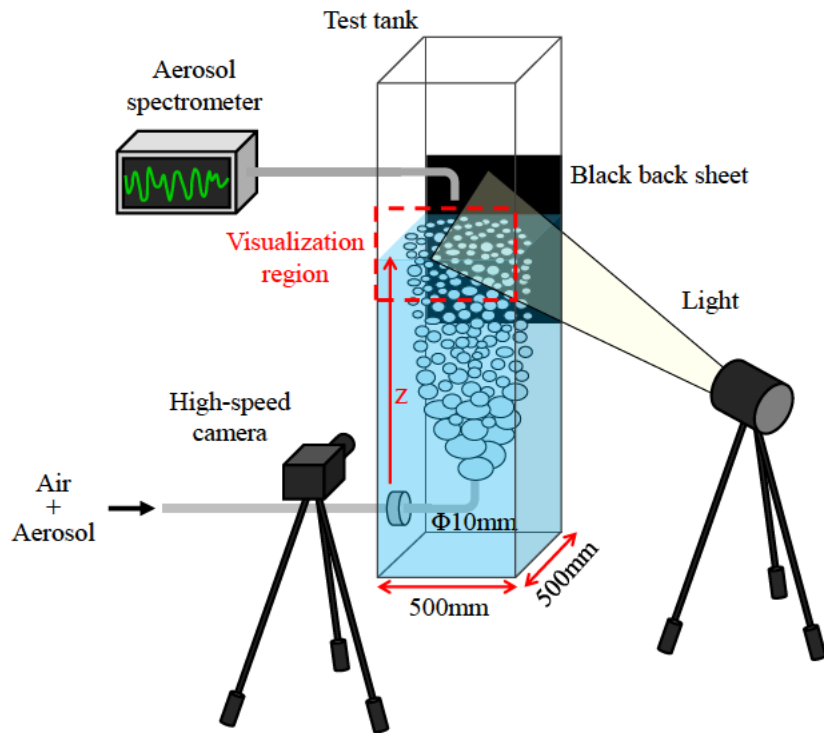


図 2.10 プール水面付近における流動挙動およびエアロゾル挙動の計測体系模式図

### 2.1.3. 混合ガウスモデルによる気泡径データ分類処理手法

図 2.11 に示すように気相噴流中には分裂していない比較的大きな気泡が残留していることがわかる。

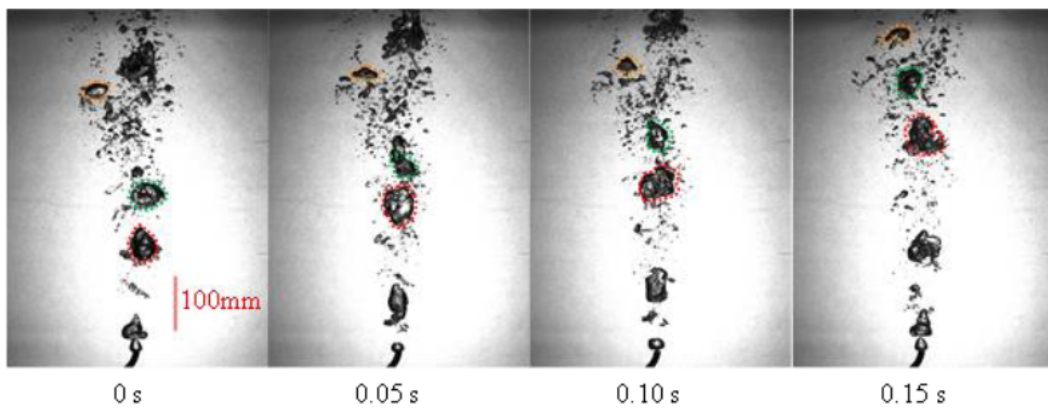


図 2.11 気相噴流中に残存する大気泡

図 2.12 (a)に示すような気泡径データに対して式(2-1)のようにして体積加重する。

$$N_{vw} = \sum_i n_i \times \frac{4}{3} \pi \left( \frac{d_{B,i}}{2} \right)^3 \quad (2-1)$$

$N_{vw}$  [m<sup>3</sup>]: 体積加重された気泡個数

$n_i$  [-]: 気泡個数

$d_{B,i}$  [m]: 気泡径

気泡径データに対して体積加重処理を施すと図 2.12 のように 2 つのピークをもつ気泡径分布が得られる。

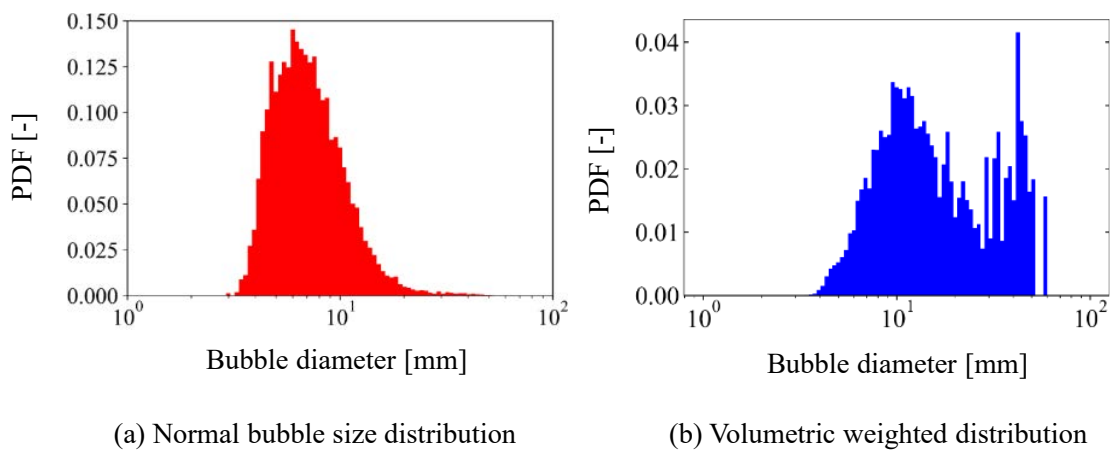


図 2.12 個数基準の気泡径分布と体積加重した気泡径分布

以上に加えてさらに MELCOR の流動モデルにおいても気泡群はグローブールとスウォーム中小気泡の 2 種類から構成される。これらのことから気泡径データを大小 2 種類に分類し評価し MELCOR の流動モデルと比較することが有効的であると考えられる。混合ガウスモデル (GMM) を用いたクラスター分析を活用する。気泡径データに対する体積加重処理に加えて自然対数をとったデータに対して GMM によるクラスター分析を行った一例を図 2.13 に示す。左側の正規分布に分類されたデータを小気泡成分、右側の正規分布の分類されたデータを大気泡成分とする。成分ごとのデータを用いて平均径や体積比率を算出する。

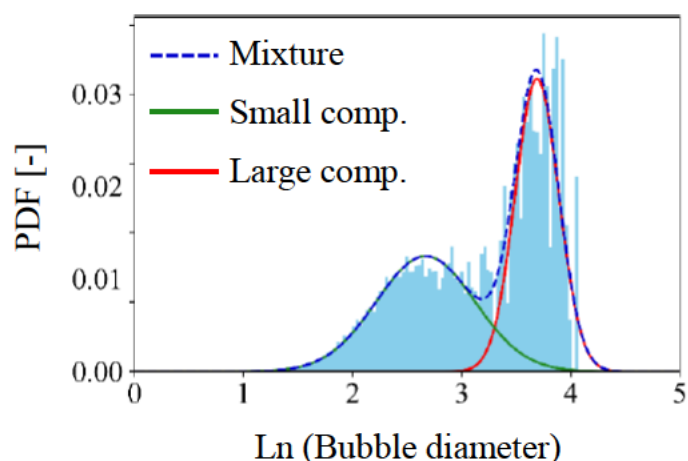


図 2.13 気泡径分布に対する混合ガウスモデルによるクラスタリング処理結果

#### 2.1.4. 混合ガウスモデルによる分類処理結果

既存のプールのクラビングによる DF 評価に関する実験的研究<sup>[8][14][15][16][17]</sup>においては、キャリアガス流量や蒸気-非凝縮性ガス分率、プール水温、エアロゾル粒径といった実験パラメータが除染効果すなわち DF に及ぼす影響の評価が広く行われてきた。これらのパラメータが流動に及ぼす影響を評価する。

蒸気の有無、ガス蒸気比率、プール水温をパラメータとして WMS による流動計測を行った。表 2-3 に示す 4 条件を設定し WMS による流動計測を行った。条件 1 は空気だけの条件、条件 2 は蒸気を混合し凝縮を伴う条件、条件 3 は空気流を増やし蒸気分率を低下させた条件、条件 4 はプール水温を飽和温度近くまで上昇させた条件である。その他の共通条件は表 2-4 に示す。

表 2-3 パラメータによる流動影響への評価に用いた実験条件マトリックス

No.	Water temperature	Air flow rate	Steam flow rate	Symbol
1	85 ± 2 °C	10 L/min	0 L/min	△
2	85 ± 2 °C	10 L/min	266 L/min	○
3	85 ± 2 °C	100 L/min	266 L/min	□
4	97 ± 2 °C	10 L/min	266 L/min	◇

表 2-4 WMS 計測における共通条件

Parameter	Value
Submergence [mm]	1000
Measurement height [mm]	100, 300, 500, 700, 900 mm from nozzle
Gas temperature [°C]	130 ± 10
Aerosol	No particle

以上の条件下で計測したデータに対して GMM を用いた処理を行った結果を図 2.14 および図 2.15 に示す。図 2.14(a)には小気泡成分の平均径と MELCOR におけるスウォームを構成する気泡径（式(2-2)）とを比較した結果を示す。エラーバーは標準偏差を表す。また図 2.14(b)には小気泡成分の体積割合と MELCOR におけるスウォームの体積割合を比較した結果を示す。スウォーム体積割合はグローブジュール径がその初期径から線形に減少することを表す式(2-3)をもとに算出した。

$$d_B = 0.7 \cdot 10^{-0.2265 + (0.0203 + 0.0313X_{nc})^{1/2}} \quad (2-2)$$

$d_{B,i}$  [cm]: スウォーム気泡径

$X_{nc}$  [-]: 不凝縮性ガス割合

$$d_G = d_{G,o} \left( 1 - \frac{z}{12d_{G,o}} \right) \quad (2-3)$$

$d_{G,0}$  [m]: 初期グローブジュール径

$d_G$  [m]: グローブジュール径

$z$  [m]: ノズルからの距離

なお MELCOR の流動モデルにおいてはグローブジュール径についてプール水温を考慮していないため条件 2 と条件 4 の体積割合はほぼ同程度となる。

小気泡成分の平均径はノズルに近い低水深領域では条件によってばらつきが大きかった。このばらつきは流入する総気相流量や蒸気凝縮の進行速度によって生じたと考えられる。上昇すると平均径は近い値へと収束した。式(2-2)で計算される値はおよそ 7 mm 程度であり、収束値はそれに比べて大きい。これらが一致しない条件として 2 つの原因が挙げられる。1 つ目の原因は相関式がベースとした実験<sup>[18]</sup>と本研究の計測条件が異なるためである。高水深および低ウェーバ数条件という気泡がより小さくなる条件下で計測された気泡径データから相関式が構築されている。2 つ目の原因としては WMS の気泡径計測の誤差による

と考えられる。WMS はメッシュサイズ以下の気泡について気泡サイズを過大評価している可能性があるために、気泡径データを処理した結果も過大な値が出たと考えられる。低水深では条件によってばらつきがあるが上昇とともに収束したことから実験パラメータによる影響は限定的であるといえる。MELCOR のスウォーム上昇領域は全ての気泡が十分に分裂しおよそ同じサイズになるような高水深領域を想定している。定性的な傾向は MELCOR の流動モデルと実験結果とで一致しているといえる。

小気泡成分の体積割合は実験パラメータによる差は確認されなかった。スウォームの体積割合に比べると小気泡成分の体積割合は下流においても低い傾向がある。また割合の上昇傾向も緩やかである。

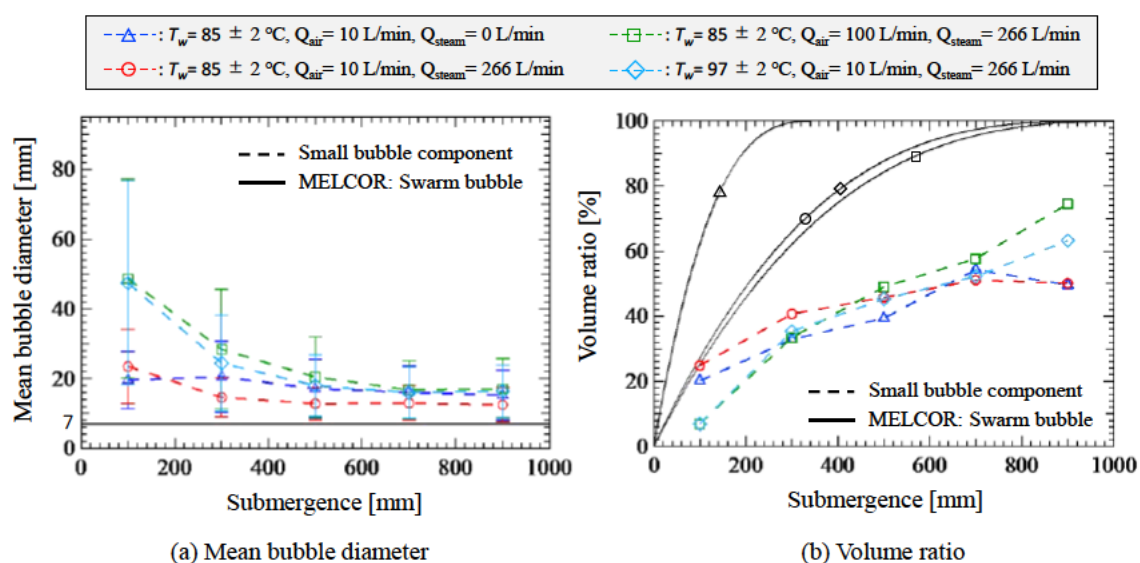


図 2.14 混合ガウスモデルによる小気泡成分の分析結果と MELCOR との比較

図 2.15 (a)には大気泡成分の平均径と MELCOR におけるグロービュール径とを比較した結果を示す。また図 2.15 (b)には大気泡成分の体積割合と MELCOR におけるグロービュールの体積割合を比較した結果を示す。

大気泡成分の平均径は各高さで条件によってばらつきがある。DF が一般的に低くなるような条件である低蒸気分率 (□) や高プール水温条件 (◇) では平均径が大きい。逆に DF が一般的に高くなるような条件である低プール水温条件かつ高蒸気分率 (○) では平均径は小さくなる。したがって実験パラメータは特に大気泡成分に影響したといえる。また、グロービュール径と比べると水深が高い位置においてもある程度の大きさを維持している。しかしながら、図 2.15 (b)のように大気泡成分の割合は減少した。分裂せずに上昇する大気泡がある一方で小気泡成分へと分類される小気泡へと分裂したことを示していることと考えられる。もしくは下流が気泡の合体が生じたことにより気泡径が維持されたことも想定され

る。

グローブールの体積割合に比べると大気泡成分の体積割合は下流においても高い傾向がある。また割合の減少傾向も緩やかである。流動モデルにおいてはグローブールの分裂現象を実現現象よりも簡素的かつ理想的に評価していると考えられる。

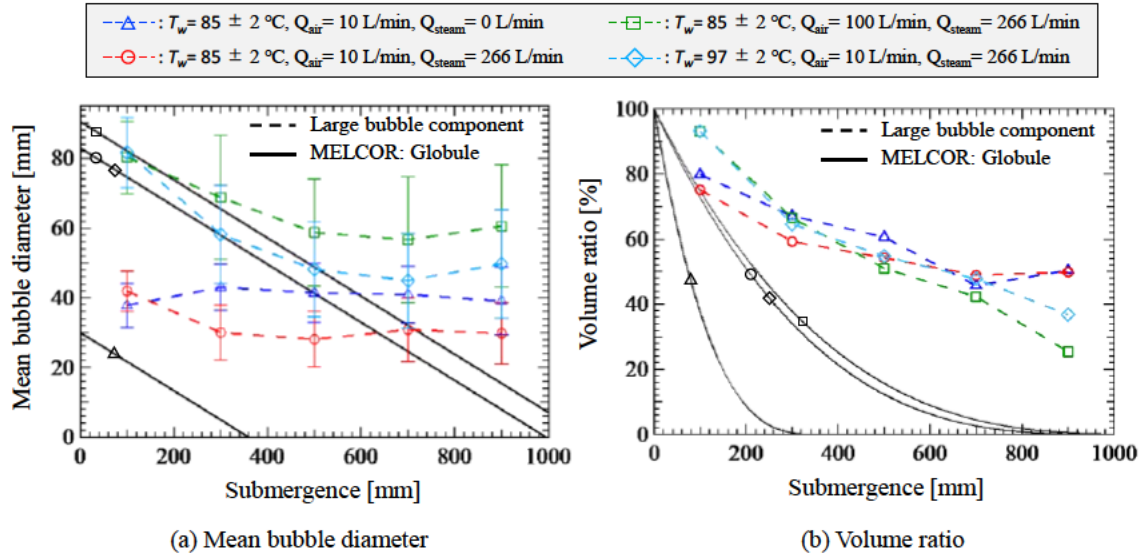


図 2.15 混合ガウスモデルによる大気泡成分の分析結果と MELCOR との比較

図 2.16 および図 2.17 に示した結果は総気相流量が大きく異なる条件で比較を行ったものである。全体の総気相流量を一定にした条件においても GMM による気泡径データ処理を行った。表 2-5 に示すように総流量を 250 L/min となるように空気流量と蒸気流量を調節して計測を行った。

表 2-5 総気相流量一定条件におけるパラメータによる流動影響への評価に用いた実験条件マトリックス

No.	Water temperature	Air flow rate	Steam flow rate	Symbol
1	$30 \pm 5^\circ\text{C}$	250 L/min	0 L/min	$\Delta$
2	$30 \pm 5^\circ\text{C}$	90 L/min	160 L/min	$\square$
3	$30 \pm 5^\circ\text{C}$	25 L/min	225 L/min	$\circ$

以上の条件下で計測したデータに対して GMM を用いた処理を行った結果を図 2.16 および図 2.17 に示す。図 2.16 には大気泡成分の体積割合の高さ方向の推移を示した。条件 3 (O) の減少はやや緩やかではあるが全体の傾向は概ね同様である。図 2.17 には小気泡成分

および大気泡成分の平均径の高さ方向の推移を示した。小気泡成分は上昇とともに近い値へと収束した。空気流量が多いほど収束値に収束するまでの水深が高くなる傾向がある。大気泡成分は下流においても大きさを維持しており、空気流量が多いほど大気泡成分の平均径が大きかった。以上の結果からキャリアガス中の非凝縮性ガス流量が多いほどスウォームが十分に発達するまでの水深が高くなる可能性がある。

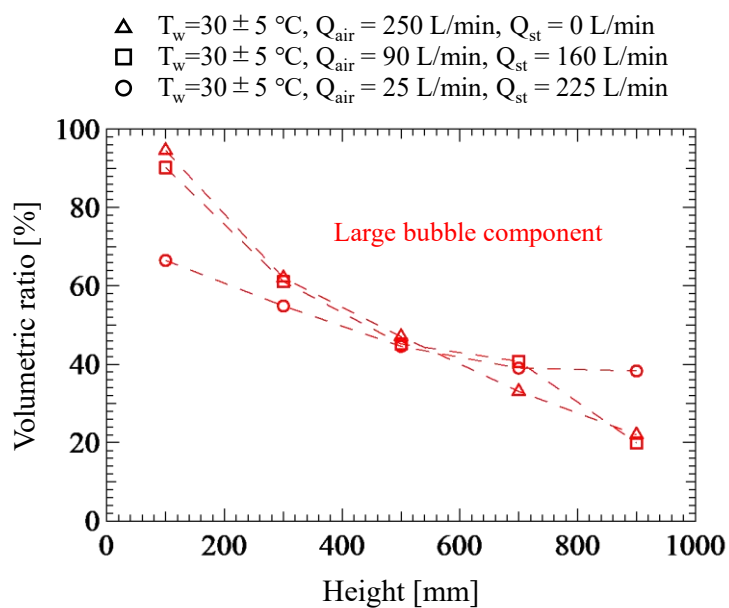


図 2.16 総気相流量一定条件における大気泡成分の体積割合の比較

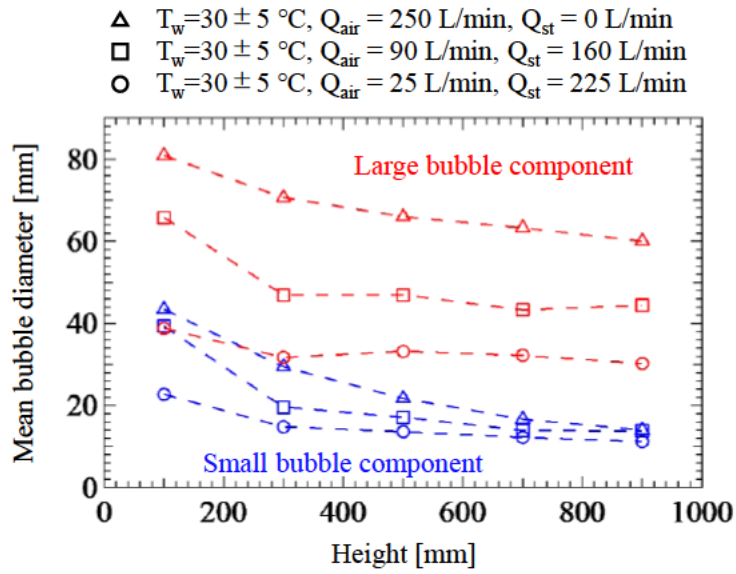


図 2.17 総気相流量一定条件の小気泡成分および大気泡成分の平均気泡径の比較

続いて、エアロゾルの水溶性をパラメータとして流動を計測した。エアロゾルに水溶性および密度の異なる CsI およびシリカを混合させた条件と空気単相条件で WMS にて気泡径分布を取得し、GMM にて大気泡と小気泡を分類した結果を図 2.18 に示す。エアロゾルの有無および種類によって大気泡、小気泡径の傾向は一致しており、エアロゾルの気泡径に与える影響は少ないことがわかった。また、図 2.15 で得られた結果同様に大気泡径はサブマージエンスの増加に伴い変化しない傾向であり、小気泡径は減少傾向にあることが分かった。

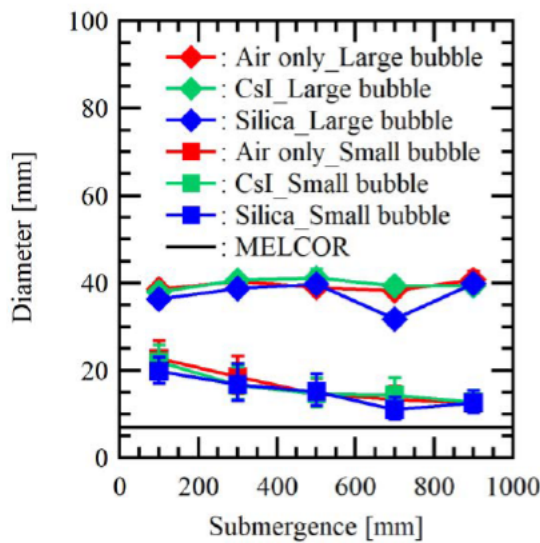




図 2.18 エアロゾル条件ごとの大気泡および小気泡径とサブマージェンスの関係

図 2.18 で示した GMM によって分類した気泡径において CsI を混合させた条件において、大気泡の体積割合と小気泡の体積割合を算出した。MELCOR における大気泡および小気泡の体積割合との比較を図 2.19 に示す。MELCOR においてサブマージェンス 400 mm 程度で大気泡が消滅し、完全にスウォーム上昇領域となるが、実験結果では、大気泡がサブマージェンス 900 mm においても 3 割程度残存していることがわかった。

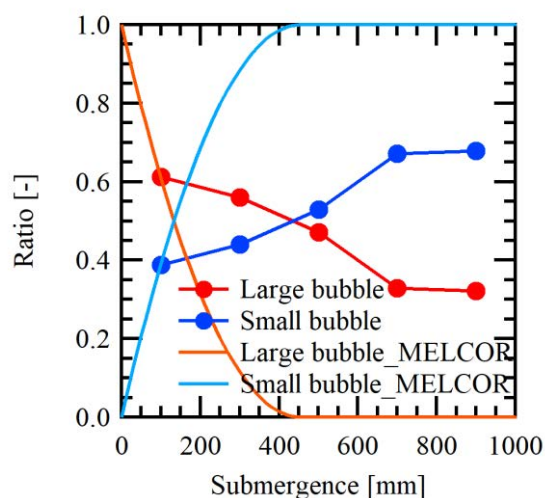


図 2.19 大気泡および小気泡の体積割合とサブマージェンスの関係

## 2.2. 二相流の詳細計測

### 2.2.1. 流動挙動およびエアロゾル挙動の可視化計測

プール水面付近の領域を可視化することで水面に達するガスの挙動とエアロゾルの放出挙動を同時に取得した。同時に取得することでガス流動現象とエアロゾルの輸送現象との間の関連性を考察する。可視化実験条件を表 2-6 に示す。

表 2-6 プール水面可視化実験条件

Parameter	Value
Feed rate [mm/h]	30
Rotating speed [rpm]	1150
Air flow rate [L/min]	30

Frame rate [fps]

250

Aerosol

Barium sulfate ( $\text{BaSO}_4$ )

図 2.20 は比較的大きな気泡が上昇し水面に達したのちにエアロゾルが放出される様子を可視化したものである。水面 ( $z = 500 \text{ mm}$ ) に大気泡が達し (0-200 ms), 表面張力により破裂せずに周方向に流れ (200-292 ms), 気泡が崩壊し (300 ms), 高濃度のエアロゾルが放出され拡散した (300-340 ms)。この現象は大気泡が水面に達して崩壊した後に発生しており, 大気泡が小気泡よりも高濃度のエアロゾルを輸送していると考えられる。仮に大気泡と小気泡とで輸送するエアロゾル濃度が同程度であれば, 可視化で確認されたよりも高頻度で高濃度エアロゾル放出が発生すると推測される。また, 水深がより深い条件 ( $z = 800 \text{ mm}$ ) でも観察を行ったところ, 定性的ではあるが高濃度エアロゾルの放出頻度が減少したことを確認した。

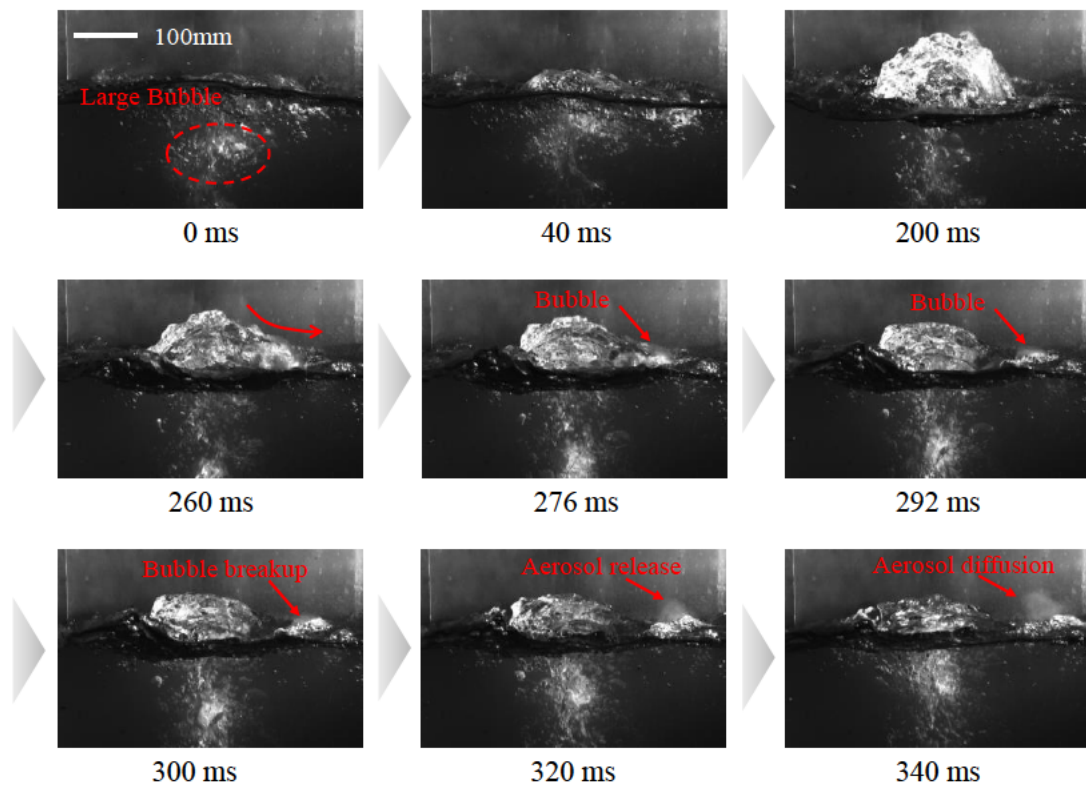


図 2.20 大気泡による高濃度エアロゾル輸送

可視化のみでなく, プール水面におけるエアロゾル濃度も計測した。図 2.21 には 60 s 間の個数濃度変動を示す。サブマージェンス  $z = 500 \text{ mm}$  における濃度は  $z = 800 \text{ mm}$  に比べて高いだけでなくその変動も大きいことがわかる。

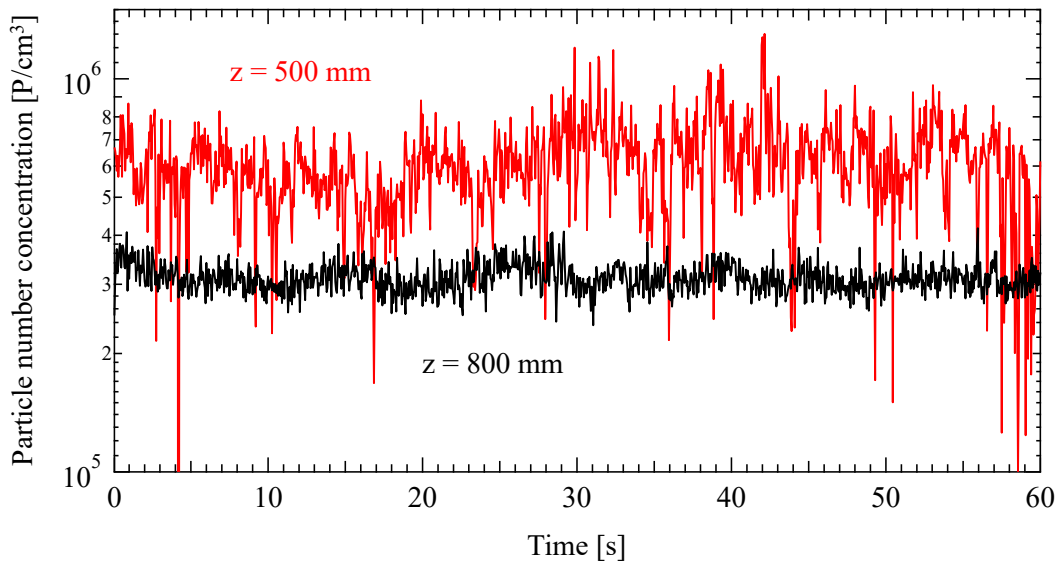


図 2.21 プール水面付近のエアロゾル個数濃度

### 2.2.2. 二相流におけるボイド率・気相速度・気泡径計測結果

プール水温や空気流量，蒸気流量といったパラメータによる流動への影響を評価するために表 2-7 に示す 4 条件で WMS によって計測した．図 2.22(a)に平均ボイド率分布を，図 2.22(b)には平均気相速度を示す．ノズルに近い領域では水温が高い条件ではボイド率が高く，蒸気が凝縮せずに残っているが，上昇とともに凝縮してボイド率が低水温条件と同程度になった．気相速度はノズルに近い領域では総気相流量に依存するだけではなく，高水温条件においては凝縮速度が緩やかであるために低水温条件と差がみられた．水深 500 mm では条件による差はほとんどなく，MELCOR のスウォーム上昇速度の相関式と良い一致を示した．

表 2-7 パラメータによる流動影響への評価に用いた実験条件マトリックス

No.	Water temperature	Air flow rate	Steam flow rate	Symbol
1	85 ± 2 °C	10 L/min	0 L/min	△
2	85 ± 2 °C	10 L/min	266 L/min	○
3	85 ± 2 °C	100 L/min	266 L/min	□
4	97 ± 2 °C	10 L/min	266 min	◇

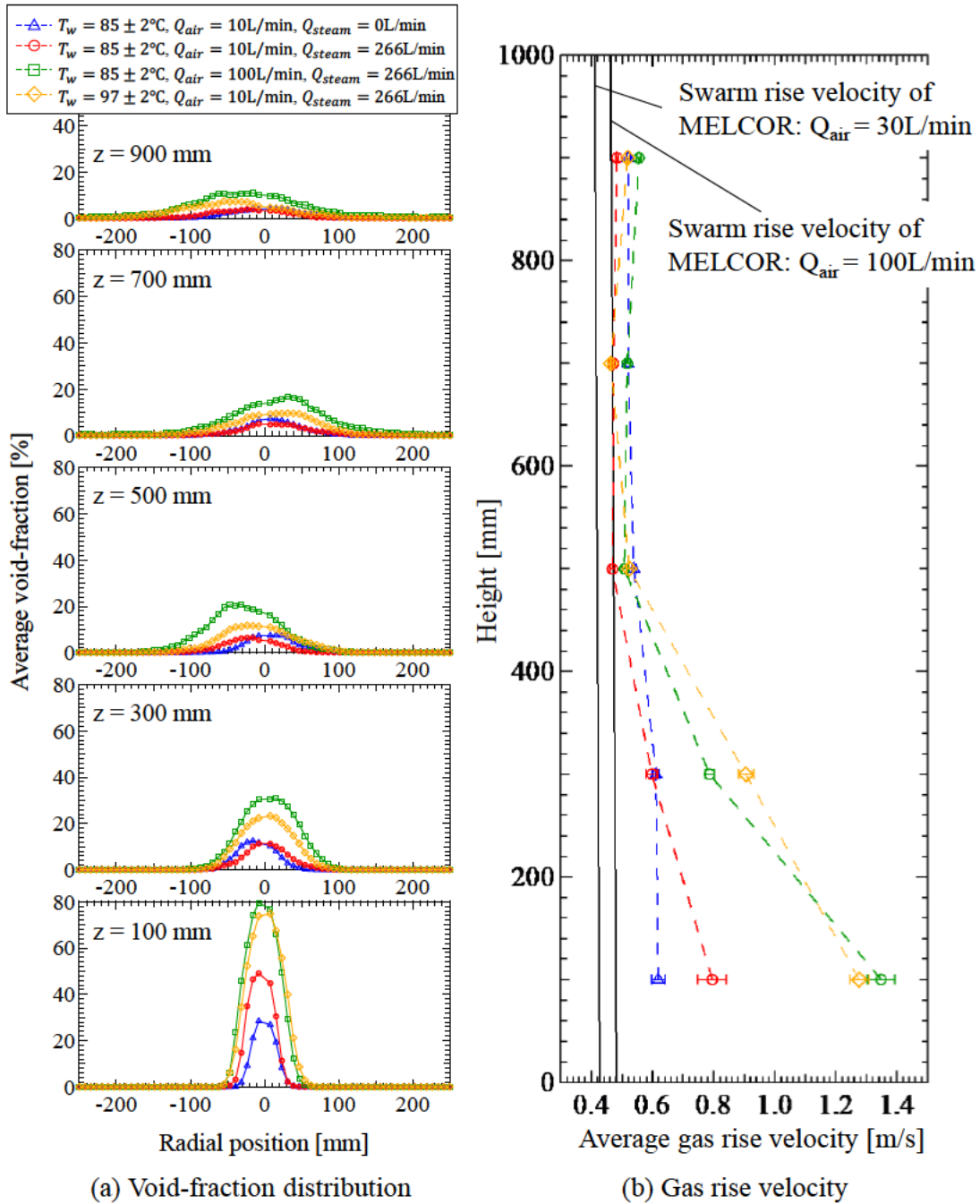


図 2.22 断面平均ボイド率分布と断面平均気相速度

エアロゾルにシリカ, CsI を用いた条件および空気単相での気液二相流の各サブマージェンスにおけるボイド率を WMS によって計測した. 30 秒間計測したボイド率の平均値を算出したものを図 2.23 に示す. サブマージェンスの増加に伴うボイド率の減少傾向はエアロゾルの有無およびエアロゾルの種類に関わらず一致した. 気泡の分裂および微細化挙動に

より水平方向に気泡が拡散し、平均ボイド率が減少していることによりボイド率が減少していると考えられる。一方で気相中のエアロゾルの存在およびエアロゾルの水溶性が気泡の水平方向への拡散挙動に及ぼす影響は少ないと考えられる。

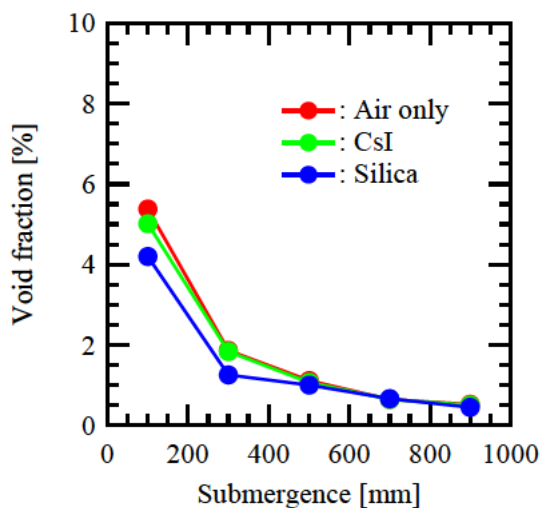


図 2.23 各エアロゾル条件における平均ボイド率とサブマージェンスの関係

WMSによりCsIを混合させた気液二相流の各サブマージェンスにおける気泡径分布を取得した。結果を図2.24に示す。サブマージェンスの増加に伴い気泡数が増大していることがわかる。すなわち、サブマージェンスの増加に伴い気泡が分裂、微細化し、気泡数が増大していることが確認できる。

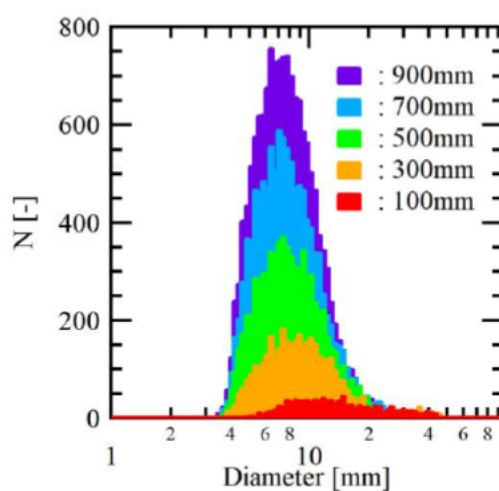


図 2.24 各サブマージェンスにおける気泡径分布

空気単相条件, CsI およびシリカを気相に混合させた条件において計測した気泡径分布に対して個数平均径を算出し, 比較したものを図 2.25 に示す. 個数平均径のサブマージェンスの増加に伴う減少傾向はエアロゾルの有無およびエアロゾルの種類によらず一致した. すなわちサブマージェンスの増加に伴う気泡径分布の変化において, 水溶性エアロゾルが気泡形状に与える影響は少なく, 空気単相による気泡の分裂, 拡散挙動が, エアロゾルの混合した気液二相流挙動において支配的であると考えられる. また MELCOR におけるスウォーム上昇領域での気泡径を黒の実線で示す. MELCOR においてスウォームは 7 mm の単一径の気泡で定義されており, これと計測した個数平均気泡径と比較すると気液二相流上流では一致しないが, サブマージェンスが増加していくと一致する傾向がみられた.

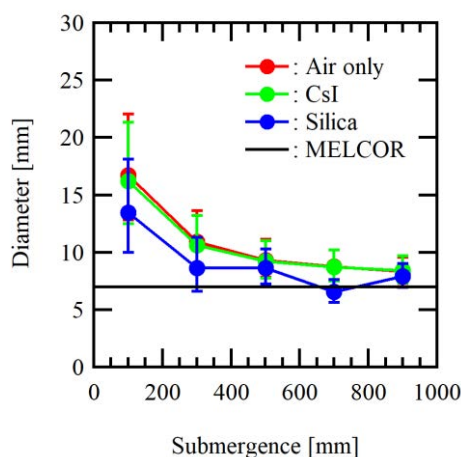


図 2.25 各エアロゾル条件における個数平均気泡径とサブマージェンスの関係

WMS にて各エアロゾル条件における平均気相速度を取得したものを図 2.26 に示す. 各条件においてサブマージェンスの増加に伴う減少傾向が一致した. すなわちエアロゾルの混合した気泡も形状は変化しないために空気単相のものと気泡径分布, 水平方向の拡散挙動が変わらないために気相速度も変化しないと考えられる. また Zuber と Findlay<sup>[19]</sup>による単一気泡における終端速度  $v_T$  の定義式を以下に示す.

$$v_T = 7.87 \left( \frac{\sigma}{\rho_l} \right)^{\frac{1}{4}} (d_B \leq 5 \text{ mm}). \quad (2-4)$$

$$v_T = 1.40713 v_T (d_B \leq 5 \text{ mm}) d_B^{0.49275} (d_B > 5 \text{ mm}). \quad (2-5)$$

$d_B$  [cm]: 気泡径

$\sigma$  [dyne/cm]: 表面張力

$\rho_l$  [g/cm<sup>3</sup>]: 連続相の密度  
 $v_T$  [cm/s]: 気泡の終端速度

$d_B$  に図 2.25 の個数平均気泡径を代入したものを黒のプロットで示した。算出した単一気泡の速度と計測して得られた気液二相流の気相速度を比較すると気液二相流の気相速度の方が速いことが確認できた。これは気泡の浮力によって液相が押し上げられ気液二相流中心部で浮力方向の液相速度が誘起されることによって気泡が搬送されるためだと考えられる。また MELCOR において気液二相流の平均速度  $v_{sw}$  は以下の式で定義される。

$$v_{sw} = \left[ \frac{Q_s + 5.33}{3.011 \times 10^{-3}} \right]^{\frac{1}{2}} (1 - 3.975 \times 10^{-4} \times z). \quad (2-6)$$

$Q_s$  [L/s]: 気相流量  
 $z$  [cm]: ノズルからの距離

サブマージェンスの増加に伴い減少していく定義式となっているが、サブマージェンス 0 mm から 900 mm の範囲ではほとんど変化しない傾向にある。この式と実験結果を比較すると上流において MELCOR は気相流速を過大評価しているが、サブマージェンスの増加に伴って計測結果と MELCOR の速度定義式が一致していく傾向を示した。

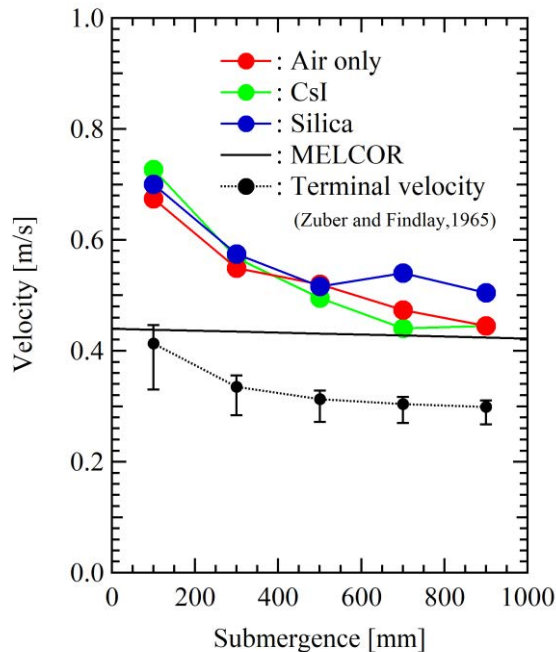


図 2.26 各エアロゾル条件における平均気相流速とサブマージェンスの関係

### 2.2.3. 二相流におけるエアロゾル計測および DF 計測

エアロゾルの計測には 35 W キセノンランプの白色光源の 90 度散乱光を使った光学計測手法であるエアロゾルスペクトロメータを用いる。エアロゾルスペクトロメータはコントローラ部 (WELAS digital 2000, Palas) とセンサ部 (WELAS 2070, Palas) から構成される。図 2.27 に示すようなセンサ部に光ファイバを通じてパルス信号を送る。散乱光のパルス波高から粒径を、パルス波数から粒子数を算出する。

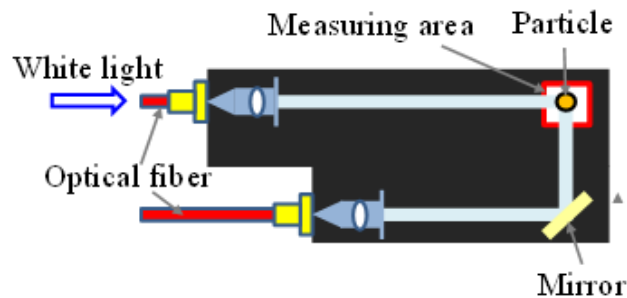


図 2.27 エアロゾルスペクトロメータのセンサ部模式図

DF 計測は 2 通りのエアロゾル計測手法を用いて行った。1 つ目は図 2.28 に示すように、DF 算出のためのインレットエアロゾルとアウトレットエアロゾルを別々に (非同時) 計測する手法である。2 つ目は図 2.29 に示すようにインレットエアロゾルとアウトレットエアロゾルを同時に計測する手法である。本研究では DF 計測において粒子として硫酸バリウム・ヨウ化セシウム・シリカを使用しており、それぞれの粒子のガスに対する追従性を考慮して 2 通りの手法を用いた。

1 つ目の計測手法では DF 算出のためのインレットエアロゾル質量を図 2.28 (a) のようにドライ状態 (水深 0 mm) で行い、アウトレットエアロゾル質量を図 2.28 (b) のようにウェット状態 (水深 100-1000 mm) で行った。水面からサンプリングノズルまでの空間を満たす体積のガスが供給された仮定できるタイミングでのエアロゾル計測結果から DF を算出する。定常状態にてエアロゾルを発生させた状態で水槽にガスを供給し続ける。計測直前まで 1800 L/min で吸引し換気する。換気を停止後から計測開始する。エアロゾル計測は水面から 150 mm の位置にサンプリングノズル先端を設置して行った。ガスを 30 L/min で供給し水面からサンプリングノズルまでの空間 ( $500 \times 500 \times 150 \text{ mm}^3$ ) と等しい体積が流入する時間 (75 s) 付近でのエアロゾル濃度を用いて DF を計算する。今回は換気停止後 90-110 s で計測した質量を算出に用いた。本手法ではインレットエアロゾルおよびアウトレットエアロゾルを同時に計測していないため、DF 算出においてインレットエアロゾル計測による誤差が生じる可能性がある。



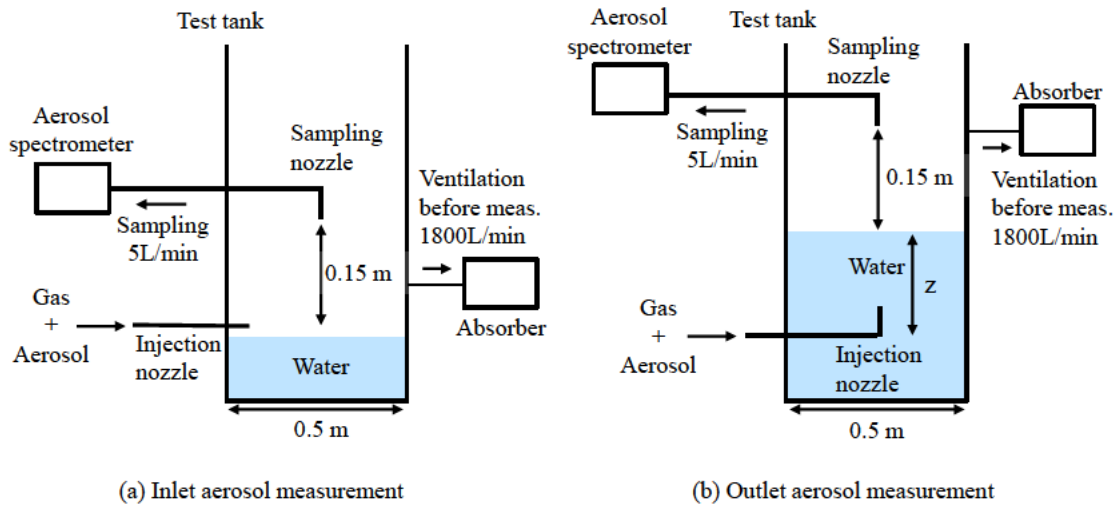


図 2.28 インレットおよびアウトレットエアロゾルの非同時 DF 計測手法

2 つ目の計測手法では図 2.29 に示すようにインレットエアロゾルとアウトレットエアロゾルを同時計測することで DF を算出する。インレットはプール水に流入直前にサンプリングポイントを設定しており、流量 5 L/min でサンプリングしている。アウトレットはプール水面から 150 mm の位置にサンプリングノズル先端を設置して、流量 5 L/min でサンプリングしている。1 つ目の計測手法同様に計測直前まで 1800 L/min で換気し、300 秒間の計測を 3 回続けて行う。プールに流入させるガス流量は 30 L/min, 60 L/min とし、サブマージェンスは 100-900 mm で計測した。本手法ではインレットエアロゾル濃度が安定しないために計測器で濃度の計測上限を超えることに起因するエラーが発生することが多い。本実験では高濃度に起因するエラーが発生していないデータについて評価を行った。

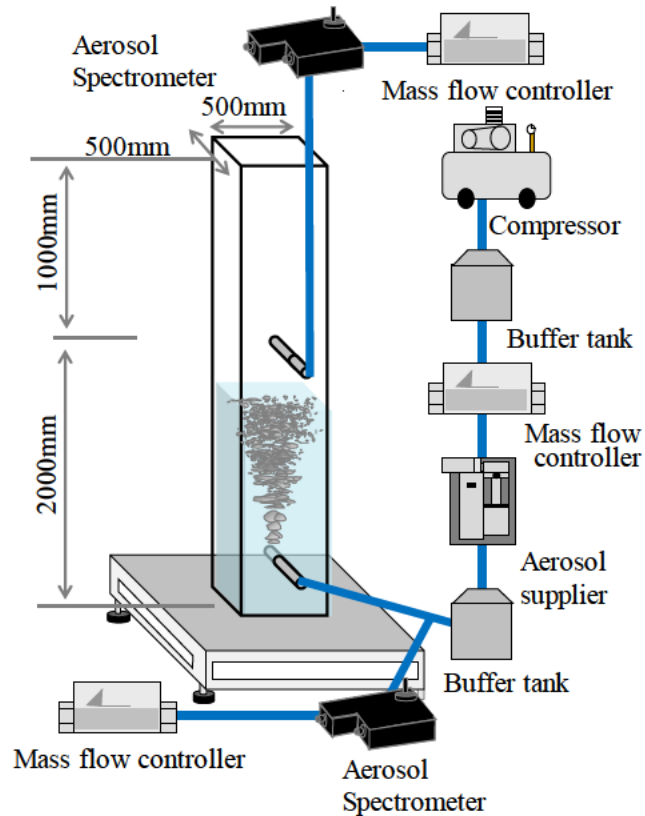


図 2.29 インレットおよびアウトレットエアロゾルの同時 DF 計測手法

#### 2.2.4. サブマージェンスによるエアロゾル除去効果への影響

サブマージェンス毎の DF を非同時計測手法により計測した。表 2-8 に計測条件を示す。図 2.30 には水槽内の換気を停止した後の 90-110 s の 20 秒間に計測したエアロゾルの粒径分を示す。ドライ条件 ( $z = 0$  mm) のエアロゾルに比べてウェット条件 ( $z = 100-1000$  mm) は小粒径粒子の割合が高く、大粒径粒子の割合が低い。またドライ条件から水深  $z = 100$  mm 条件への変化は大きいですが、ウェット条件間で水深を深くしていった際の変化は少ない

表 2-8 サブマージェンス毎の DF 計測条件

Parameter	Value
Submergence [mm]	100, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000
Air flow rate [L/min]	30
Steam flow rate [L/min]	0
Gas temperature [°C]	Room temperature
Water temperature [°C]	Room temperature

Aerosol

Barium sulfate

Nozzle inner diameter [mm]

10

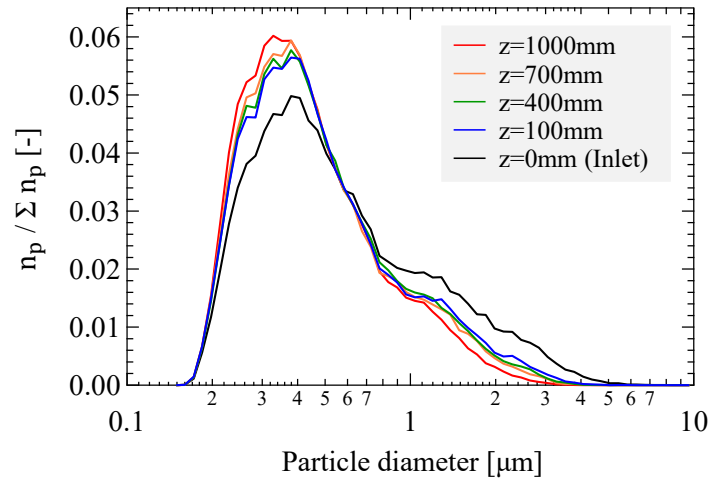


図 2.30 サブマージェンスごとの粒子径分布の比較

図 2.31 にはサブマージェンスごとの各種平均径の変化を示している。質量平均径 (Mass mean diameter: MMD)、個数平均径 (Count mean diameter) および幾何平均径 (Geometric mean diameter: GMD) を用いて評価した。各平均径の定義はそれぞれ以下の通りである。

$$MDD = \frac{\sum nd^4}{\sum nd^3}. \quad (2-7)$$

$$CMD = \frac{\sum nd}{N}. \quad (2-8)$$

$$GMD = \exp \left[ \frac{\sum \ln d}{N} \right]. \quad (2-9)$$

$d$  [m]: 気泡径

$n$  [-]: 気泡径ごとの気泡個数

$N$  [-]: 気泡の総個数

いずれの平均径もドライ条件からウェット条件との間において最も減少が顕著である。したがって粒径分布の変化が最も大きいのはプール水中へと流入した直後であり、その後プール水中を上昇していく間の変化は緩やかである。プールに流入した際の初期慣性衝突

による粒子の除去が大きく影響しているのではないかと考えられる。初期慣性衝突による粒子除去効果は粒径によって異なることから粒径ごとに DF といった除去効率を評価する必要がある。

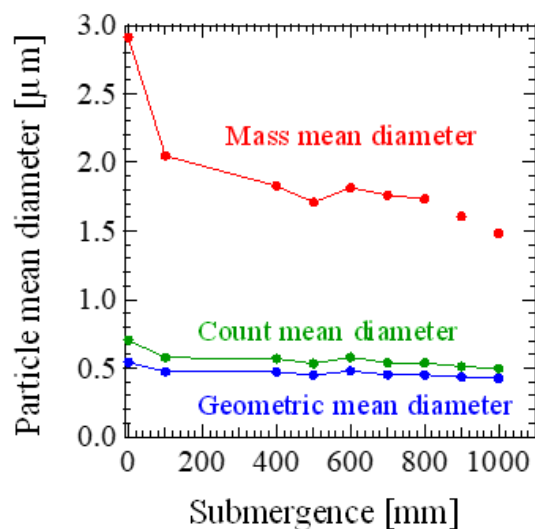


図 2.31 エアロゾルの質量平均径・個数平均径・幾何平均径の変化の比較

図 2.32 には粒径ごとのサブマージェンスに対する DF を示す。小粒径粒子は低サブマージェンス条件では DF は同程度であるが、高サブマージェンス条件では上昇する傾向がある。一方、大粒径粒子は小粒径粒子に比べて低いサブマージェンス条件から上昇傾向を示している。つまり下流で主な除染対象となるのは小粒径粒子であると考えられる。サブマージェンスに対する DF についても粒径により異なることがわかる。また、インレットエアロゾルの質量平均径 ( $2.9 \mu\text{m}$ ) 付近の粒径を境にして全粒子に対する DF との大小関係が逆転した。

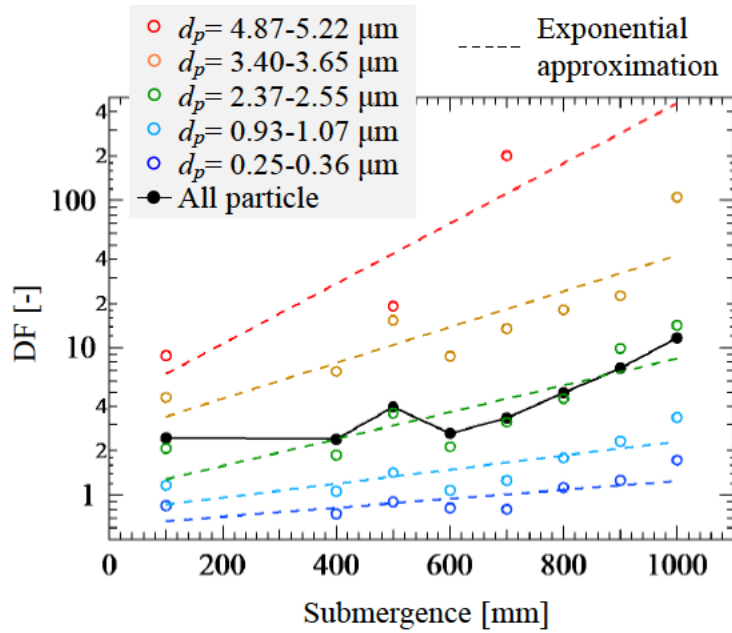


図 2.32 サブマージェンスに対する粒径ごとの DF

2.1.4 項では GMM を用いた気泡径データの解析から本研究スケールにおけるスウォームが十分に発達していると考えられるサブマージェンスがおよそ 600-700 mm から下流以降であることが示唆された。サブマージェンスに対する小気泡成分の平均径および体積割合の推移を比較したものを図 2.33 に示す。図 2.33 (a)では小気泡成分の平均径と質量ベースの DF 計測結果の水深に対する推移を比較した。DF が上昇し始めるのは平均径が収束し始める水深以降である。また、図 2.33 (b)では小気泡成分の体積割合と質量ベースの DF の水深に対する推移を比較した。DF が上昇し始めるのは体積割合がおよそ 50%を超えて以降である。以上のことから DF が上昇傾向に転じるサブマージェンスとスウォームが十分に発達するサブマージェンスに因果関係がある可能性がある。スウォームが十分に発達することで気泡がより小さな気泡へと分裂することで気液界面積が増加し気泡内での微粒子運動による除去が増加したと考えられる。また、大気泡による高濃度のエアロゾル輸送が減少したと考えられる。以上の結果からガスがプール水中へと噴射された直後は初期慣性衝突により大粒径粒子を中心に除去され、スウォームが発達するにしたがって気泡内部の微粒子運動による除去が機能し始めるというフェーズを経ている可能性があると考えられる。

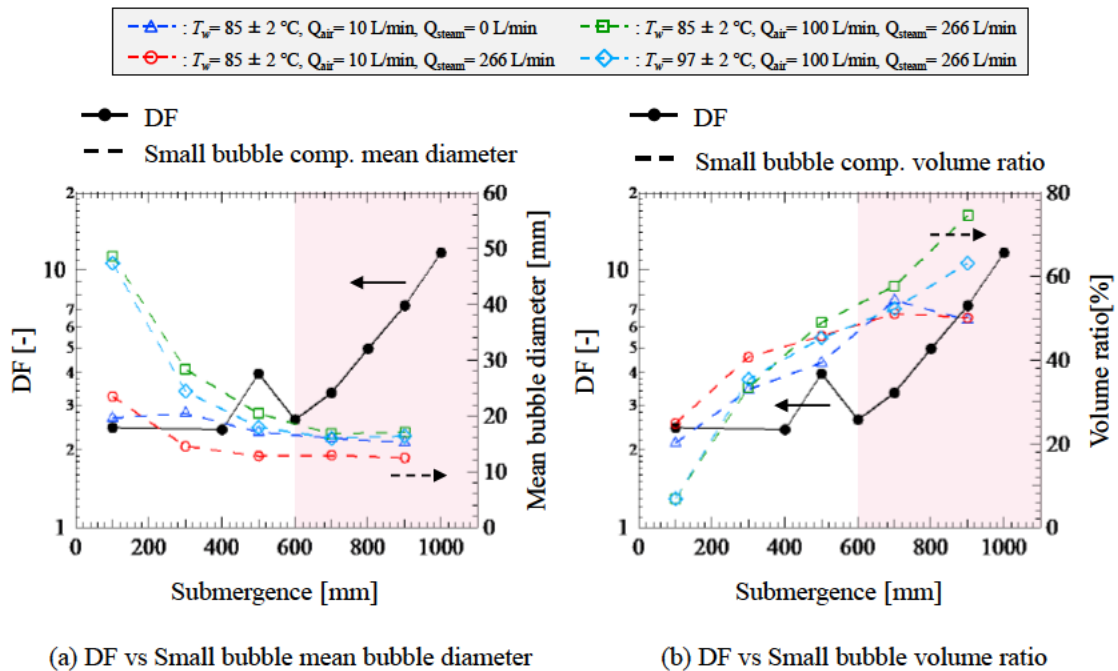


図 2.33 除染効果と二相流動現象との相関関係

以上の仮説の整合性について確認するため、既存研究<sup>[7][8]</sup>において行われた DF 計測の結果やそれを基に開発された予測モデルと比較した。図 2.34 には本研究における DF 計測結果と POSEIDON-II 実験<sup>[8]</sup>や Kanai らの研究<sup>[7]</sup>とを比較している。

POSEIDON-II 実験と比較すると、低サブマージェンスでは良い一致を示した。POSEIDON-II 実験では 20 mm の単一オリフィスから約 1700 L/min という高流量・高流速でガスが噴射されるため、本研究に比べて初期慣性衝突による粒子除去が向上すると考えられる。しかし、使用している  $\text{SnO}_2$  粒子は  $z = 250 \text{ mm}$  のアウトレット側で AMMD が約  $0.3 \mu\text{m}$  であり、本研究で使用している  $\text{BaSO}_4$  粒子の  $z = 400 \text{ mm}$  における MMD (約  $1.8 \mu\text{m}$ ) に比べて小さい。 $\text{SnO}_2$  は  $\text{BaSO}_4$  よりも密度が高いがより小粒径粒子で構成されているために、初期慣性衝突による除去効果が低下した結果、DF が本研究と同程度の値を示したのではないかと考えられる。一方で高サブマージェンスでは POSEIDON-II 実験の方が低い結果となった。またサブマージェンスが 4 倍になっているにも関わらず DF はほとんど上昇していなかった。これは高流量であるため、スウォームが十分に発達した状態となるために十分なサブマージェンスに達していないためであると考えられる。2.1.4 項の結果では非凝縮性ガス流量が多いほどスウォームが十分に発達するサブマージェンスは深くなる傾向が確認されている。また、粒径が小さいことが DF の上昇勾配の低さの原因となっている可能性もある。図 2.32 に示したように粒径が小さいほど DF が低く、水深に対する上昇勾配もまた低いことが確認されている。

Kanai らの研究と比較すると、本研究の DF が上昇傾向に転じて以降の上昇勾配と Kanai らの DF 予測モデルの上昇勾配はある程度の整合性があると考えられる。図 2.34 に示した予測モデルの相関式は以下の通りである。

$$DF = 1.0 \times \exp\{2.5(x - 0.24)\}. \quad (2-10)$$

DF [-]: 除染係数

$x$  [m]: ノズルからの距離

本研究の DF の上昇勾配が粒径  $1 \mu\text{m}$  の粒子に対する DF 予測モデルよりもやや高いのは本研究で使用した粒子には  $1 \mu\text{m}$  以上のものが質量的に多く含まれていたためと考えられる。一方で本研究ではサブマージェンス  $600\text{-}700 \text{ mm}$  以下では DF が概ね一定となっている。この傾向は Kanai ら研究では確認されておらず、DF 予測モデルにも考慮されていない。Kanai ら研究では DF をサブマージェンス  $1500\text{-}3500 \text{ mm}$  の範囲で計測し、その結果をもとに DF 予測モデルを構築した。そのため本研究で DF を計測しているような低サブマージェンス領域では傾向が一致しないと考えられる。また Kanai らの予測モデルはサブマージェンス  $0 \text{ mm}$  では DF が 1 を下回っており、実現象とは合致しない。これらのことからサブマージェンスが増加しても DF がほとんど上昇しないような低サブマージェンス領域が存在する可能性があると考えられる。スウォームの発達状態については、総流量は大きい  $100$  個のノズルから分割して噴射しておりスウォームの発達は比較的早いと考えられる。

以上のことからスウォームが十分に発達していない低サブマージェンス領域では気泡内の微粒子運動による除染効果が十分に機能していない可能性が示された。

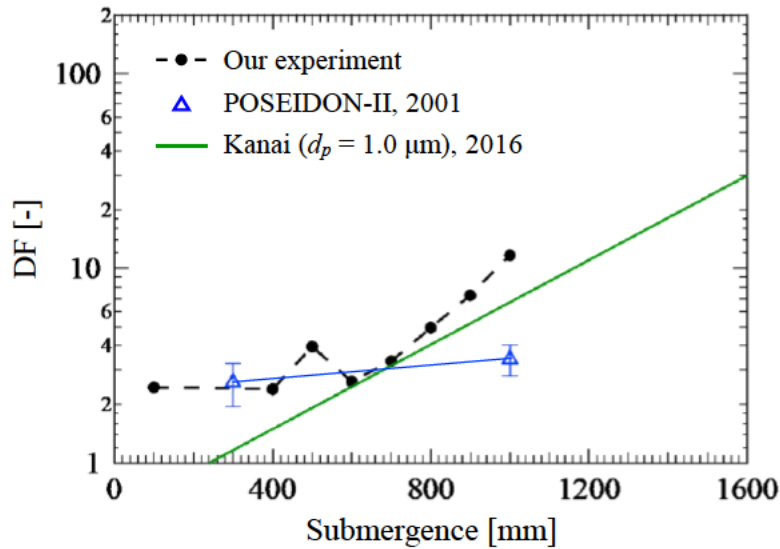


図 2.34 DF 計測結果と既存研究<sup>[7][8]</sup>における DF との比較

DF 計測結果には 2.2.3 項で述べたような誤差が含まれる可能性があり，誤差によって上述のようなサブマージェンスに対する DF 推移の傾向が生じていることが想定される．特に低サブマージェンスにおいて DF が上昇しない区間があるという特徴に対して誤差によって生じた傾向である可能性が考えられる．しかし，低サブマージェンスにおけるアウトレットエアロゾル濃度は高サブマージェンスにおけるアウトレットエアロゾル濃度に比べて高いため，相対的には DF 数値に対する誤差の影響は小さいと考えられる．

定量的に誤差による DF に対する影響を評価する．インレットエアロゾル濃度計測結果を 3 回行ったところ，最大で 28.3% の誤差が確認された．そこで DF 計測時の Dry 状態で計測したエアロゾル濃度に対して  $\pm 30\%$  で見積もって DF を算出した．その結果を図 2.35 に示す．誤差を考慮してサブマージェンスに対する DF の推移を評価しても，サブマージェンス 600-700 mm 付近を境にして上昇勾配が急峻になっているといえる．よって絶対値に対する誤差は十分に想定されるが，サブマージェンスに対する推移については概ね実現象をとらえることができている結果であると考えられる．したがって，本研究で用いた DF 計測手法による誤差を加味したとしても DF 計測結果およびそれに対する考察はスクラビング現象を評価する上で妥当であるといえる．



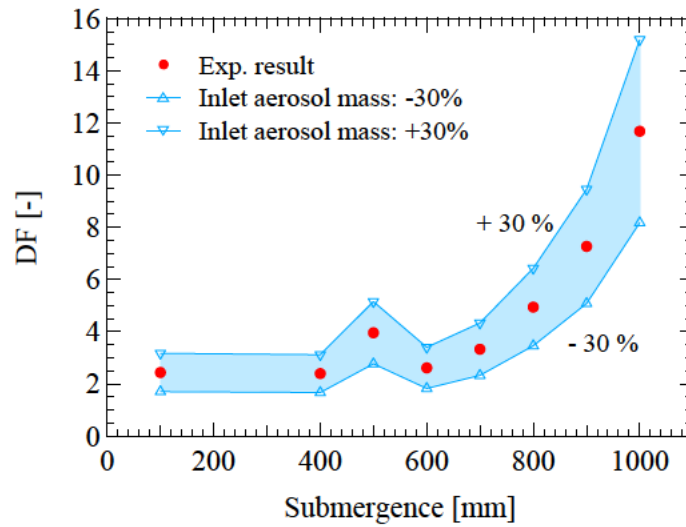


図 2.35 インレットおよびアウトレットエアロゾル非同時 DF 計測の誤差評価

### 2.2.5. ガス流量によるエアロゾル除去効果への影響

図 2.36 は図 2.29 のインレットアウトレット同時計測手法によって CsI を用いてエアロゾルの粒径分布を計測した結果である。CsI は 0.2-4  $\mu\text{m}$  の範囲で存在し、粒径 1  $\mu\text{m}$  以上の CsI は大部分が除去されていることが分かった。

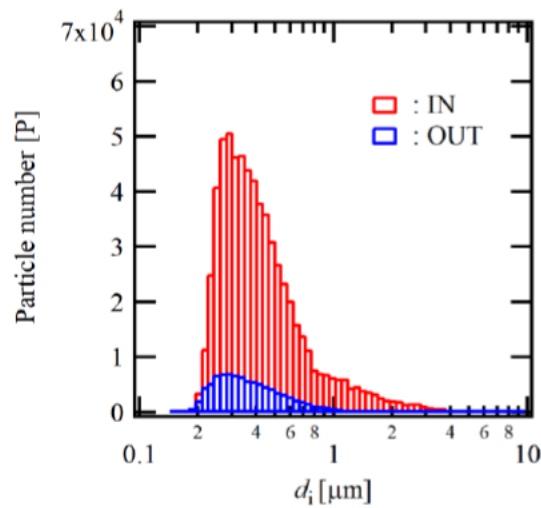


図 2.36 CsI の入口および出口で計測された粒径分布

DF はインレットでのエアロゾル質量をアウトレットでのエアロゾル質量で除したもので定義されるが、各粒径  $d$  に対してではエアロゾル質量以下のように表される。

$$DF = \frac{N_{d,in}}{N_{d,out}} \quad (2-11)$$

DF [-]: 除染係数

$N_{d,in}$  [-]: 粒径ごとのインレット微粒子個数

$N_{d,out}$  [-]: 粒径ごとのアウトレット微粒子個数

インレット流量 30 L/min および 60 L/min で各粒径の DF を計測した結果を図 2.37 に示す。粒径の増加とともに DF が増加していく傾向が得られた。また、サブマージエンスの増加に伴い DF が上昇する傾向は 30 L/min, 60 L/min の両条件でみられた。

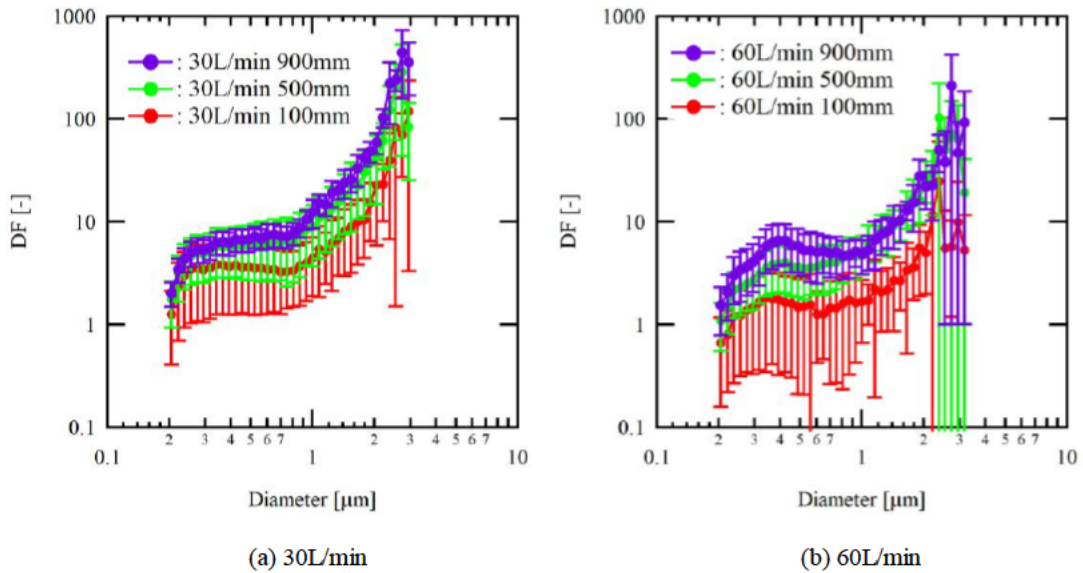


図 2.37 各流量で計測された粒径と DF の関係

質量ベースでの全体の DF は以下の式で定義される。

$$DF = \frac{\sum \frac{\pi \rho d^3}{6} N_{d,in}}{\sum \frac{\pi \rho d^3}{6} N_{d,out}} = \frac{m_{in}}{m_{out}} \quad (2-12)$$

$d$  [m]: エアロゾル径

DF [-]: 除染係数

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]: エアロゾルの密度

$m_{in}$  [-]: 粒径ごとのインレットエアロゾル総質量

$m_{out}$  [-]: 粒径ごとのアウトレットエアロゾル総質量

$N_{d,in}$  [-]: 粒径ごとのインレット微粒子個数

$N_{d,out}$  [-]: 粒径ごとのアウトレット微粒子個数

流量 30 L/min および 60 L/min で全体の DF を算出したものを図 2.38 に示す。サブマージェンスの増加に伴い DF が上昇する傾向は一致するものの、流量が高くなると DF が全体的に減少する傾向が得られた。

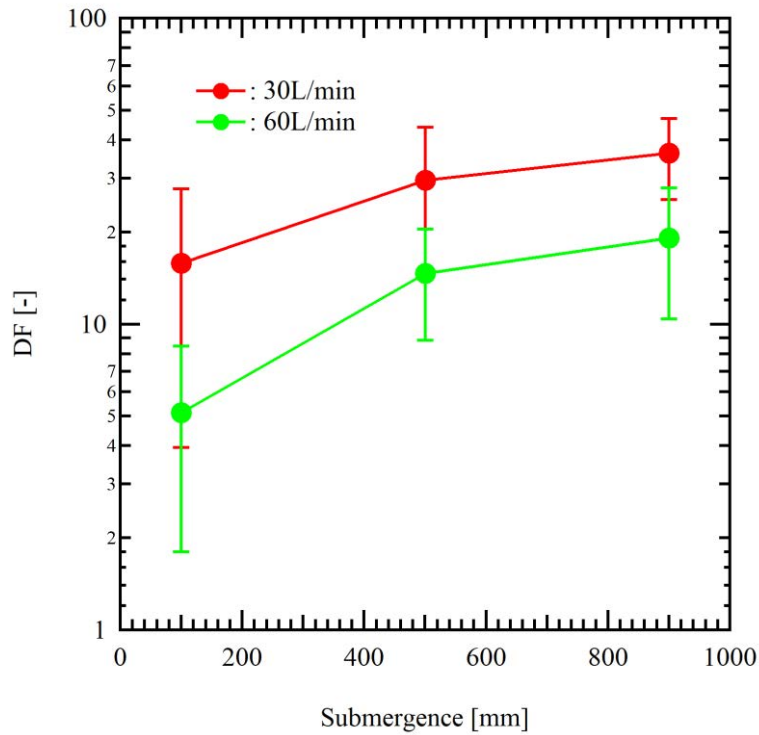


図 2.38 各流量で計測されたサブマージェンスと DF の関係

#### 2.2.6. 凝縮性ガス混合によるエアロゾル除去効果への影響

凝縮性ガスとして蒸気をキャリアガスに混合した条件での DF を非同時計測手法により計測した。表 2-9 に計測条件を示す。

表 2-9 凝縮ガス混合時の DF 計測条件

Parameter	Value
Submergence [mm]	300
Air flow rate [L/min]	30
Steam flow rate [L/min]	250
Gas temperature [°C]	130 ± 10

Water temperature [°C]	25 – 35
Aerosol	Barium sulfate
Nozzle inner diameter [mm]	10

計測結果を図 2.39 に示す。蒸気-空気混合ガスを用いて計測した DF 計測結果と空気のみを用いて計測した結果（2.2.4 項）とを比較した。蒸気を混合して計測した DF は水温が低く、また蒸気比率が高かったために空気のみを用いた DF 計測結果に比べて非常に高い値となったと考えられる。

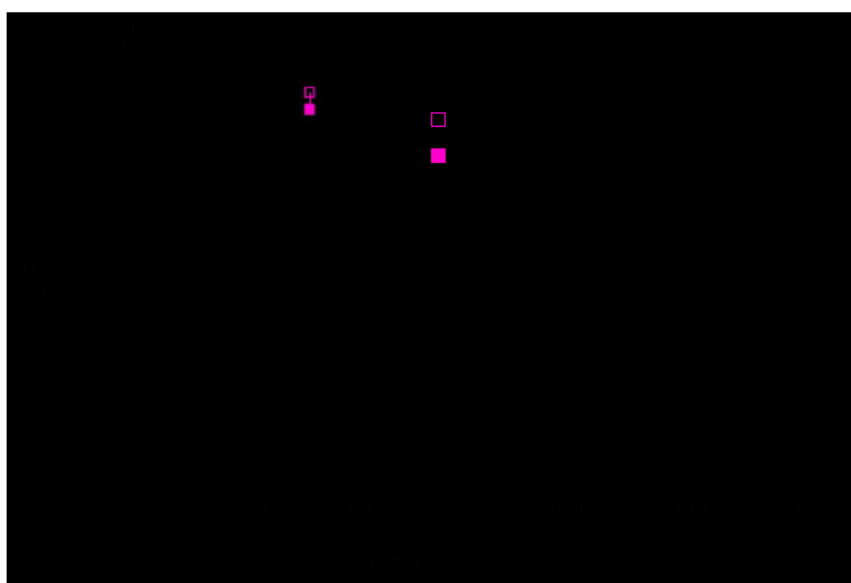


図 2.39 蒸気-空気混合ガスおよび空気単相条件における DF 計測結果の比較

### 2.2.7. 粒子の水溶性によるエアロゾル除去効果への影響

エアロゾルの水溶性および密度に起因する除染要因を調査するために CsI に粒径が近い標準粒径 0.3  $\mu\text{m}$  の単分散粒子であるシリカを用いてインレット流量 30 L/min にてエアロゾルを計測した。インレットアウトレット同時計測手法を用いた。CsI およびシリカの特性を表 2-10 に示す。

表 2-10 エアロゾルの特性

	CsI	Silica
Solubility	Soluble	Insoluble
Density [g/cm <sup>3</sup> ]	4.51	2.65
Mean diameter[ $\mu\text{m}$ ]	0.26	0.30

計測したインレットおよびアウトレットでの粒径分布を図 2.40 に示す。粒径  $0.3\mu\text{m}$  近傍をピークとした単分散の粒径分布を得た。

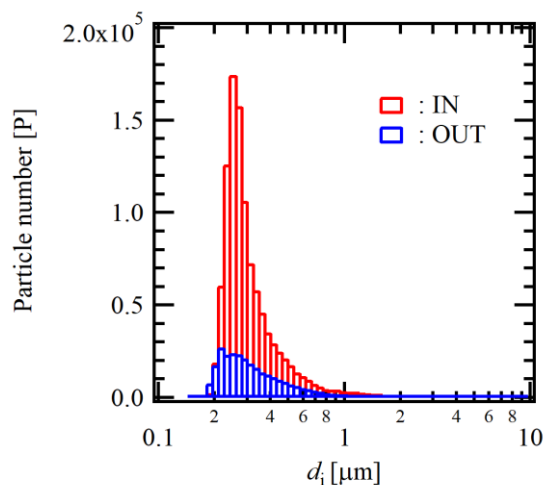


図 2.40 シリカの入口および出口で計測された粒径分布

水溶性および密度の影響を調査するために図 2.37 の CsI の粒径  $0.3\mu\text{m}$  における DF とシリカの粒径  $0.3\mu\text{m}$  における DF を比較した。結果を図 2.41 に示す。水溶性および密度の影響は少なく、粒径の影響が大きいことが分かった。

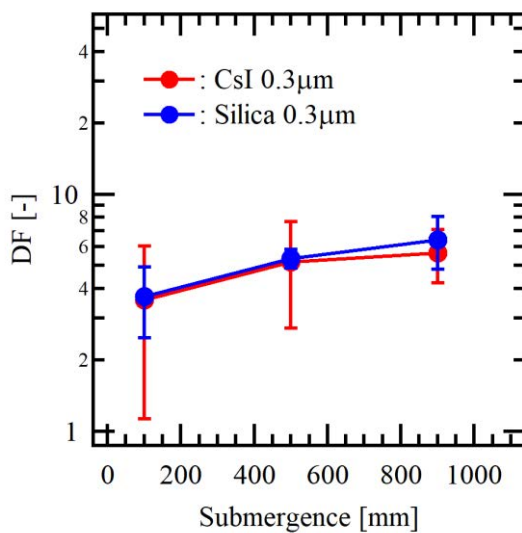


図 2.41 粒子の水溶性における DF とサブマージェンスの関係

## 2.3. 流動現象のモデル化の検討

本節では流動計測実験および DF 計測実験から得られた知見を整理するとともに、MELCOR による解析結果と比較することで流動モデルの改良案を検討する。

2.2.4 項ではグロービュールが分裂しておらずスウォームが十分に発達していない段階ではサブマージェンスに対して DF がほとんど上昇しない傾向が確認された。これは気相が十分に小さな気泡へと分裂していないために単一気泡実験で確認されているような気泡内部の微粒子運動による微粒子除去が十分に機能していないためであると考えられる。また、2.2.1 項で確認されたように大気泡によって高濃度のエアロゾルが輸送することで除染を妨げているためであると考えられる。2.2.5 項ではガス流量が大きい方が DF が低い傾向が確認された。高流量である方がノズルから水中への流入速度が速いためノズル出口における慣性衝突による除去が大きくなる一方で、スウォームの発達がより下流へと移行したために上昇中の気泡における除去効果が低下したと考えられる。2.2.6 項では蒸気凝縮を伴う条件の方が非凝縮性ガス（空気）のみの条件に比べて DF が高いことを確認した。2.2.7 項ではエアロゾル粒子の水溶性が除染効果に及ぼす影響は確認されなかった。

図 2.42 では 2.2.4 項に示したサブマージェンスに対する DF 計測結果と MELCOR による解析とを比較した。解析体系の詳細については 3.1 で述べるが、DF 計測実験体系を模擬した体系下で解析を行った。計測結果と解析結果との相違点としてはノズル近傍の領域における DF と流動計測実験から微粒子除去がほとんど機能しない低サブマージェンス領域における DF の推移である。ノズル近傍の領域における DF は計測結果に比べて解析結果は明らかに低いことがわかる。低サブマージェンス領域における DF の推移をみると、計測結果はほとんど上昇していないが解析結果では上昇している。サブマージェンスが上昇し計測結果を解析結果が上回って以降は両者の誤差が拡大している。MELCOR の二相流モデルでは実現象よりも気相の分裂を簡便にモデル化・評価しているため、低サブマージェンス領域においても DF 解析結果は上昇したと考えられる。計測結果が上昇傾向に転じて以降は解析結果と近い上昇勾配で推移している。除染効果はサブマージェンスに対する除染効果の積分であるので低サブマージェンス領域における DF の誤差が下流へと伝搬している。したがって実機相当のサブマージェンスに対する DF を評価する上でも低サブマージェンス領域における除染効果を適切に評価する必要がある。

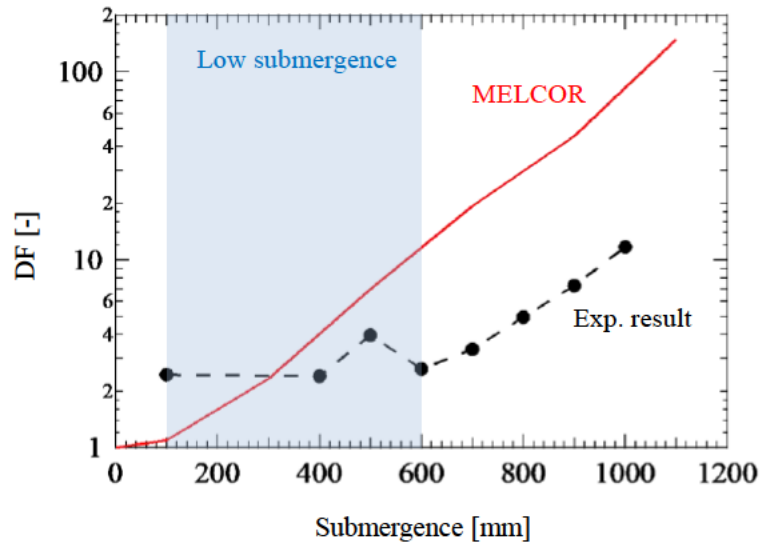


図 2.42 実験および MELCOR 解析によるサブマージェンスに対する DF の比較

以上の結果をふまえて MELCOR における従来の二相流モデル (図 2.43(a)) を基にした図 2.43 (b)に示すような改良案を提案する。改良案では流動を 4 つの領域に分類する。ベント管出口領域 (Vent exit region) ではエアロゾルを含むガスがプール水中へと流入すると蒸気凝縮とともにグロービュールを形成する。この際、蒸気凝縮現象や初期慣性衝突によりエアロゾルが除去される。スウォーム成長領域 (Swarm growth region) ではグロービュールが徐々に小気泡へと分裂していく。しかし気泡群は主にグロービュールで構成されており、スウォームは十分に発達しておらず成長段階にある。グロービュールの分裂は従来のモデルに比べて緩やかに進むように改良する必要がある。この領域のフローパスの長さは総気相流量やサブクール度に依存する凝縮速度によって変更される。この領域ではグロービュールによってエアロゾルが輸送され、小気泡は十分に小さくないため気泡内粒子運動による除去はほとんど機能しない。しかし、重力沈降や遠心力、拡散による除去を考慮する余地はある。スウォーム上昇領域 (Swarm rise region) では十分に気相噴流が小気泡群へと分裂しスウォームが発達した状態で上昇していく。この領域では小気泡内の粒子運動によって微粒子の除去が行われる。一方で一部のグロービュールは残存し高濃度のエアロゾルを気泡ブレイクアップ領域 (Bubble break-up region) へと輸送する。グロービュールによって輸送される高濃度エアロゾルは主にサブミクロンオーダーであり、質量ベースの DF では大きく影響しないと考えられるが環境中に放出されれば広く拡散する可能性がある。したがってグロービュールによる高濃度エアロゾル輸送はモデルに考慮する必要があると考えられる。気泡ブレイクアップ領域では従来のモデル同様に粒子除去は考慮しない。ただし、プール水面では大気泡が弾けるように崩壊することで高濃度のエアロゾルが放出・拡散されている (2.2.1 項)。このよ

うな現象が微粒子捕集にどのように影響するのかについては検討の必要が残る。

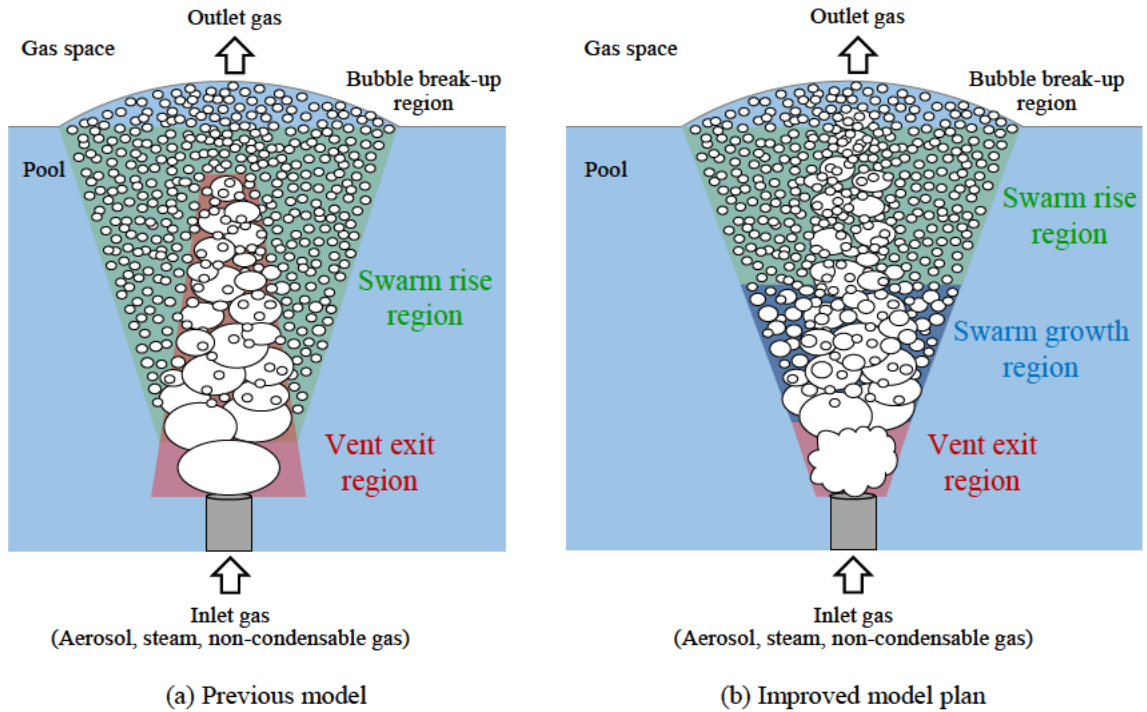


図 2.43 二相流モデルの改良案



### 3. 実験解析

原子力規制庁から無償貸与を受ける解析コード（スクラビング解析コード及び MELCOR コード）を用いて，前項で実施のエアロゾル混入実験条件における除染係数の評価を行った．実験結果と解析結果の比較により，モデル改良のための検討を実施した．

#### 3.1. 解析体系および解析条件

本年度は筑波大学における DF 計測実験と MELCOR の解析結果を比較するため，図 3.1 に示す解析体系を用いて計測を行った．解析体系は三つのコントロールボリューム(CV)，それらをつなぐ二つのフローパス(FL)からなっており，CV2 のプール部は本計測で使用する図 2.29 の DF 計測用の実験装置を模擬して計測した．表 3-1 に本年度行った MELCOR 解析の解析体系を示す．本年度は実験で行った DF 計測とあわせて DF のサブマージェンス依存性，蒸気割合，プール水温の三つに着目した．サブマージェンスについては実験と同様の 5 条件 ( $z = 300, 500, 700, 900, 1100$  mm)とし，ノズル径は 10 mm の上昇流，不凝縮性ガスは空気で 30 L/min に固定した．凝縮性ガスの条件については CV1 の湿度を変更することで再現し，解析条件 No. 6–15 で空気に加えて 250 L/min，373 K として計算を行った．解析条件 No. 11–No. 15 についてはプール水温を 373 K とし，液温が DF に与える影響を解析した．

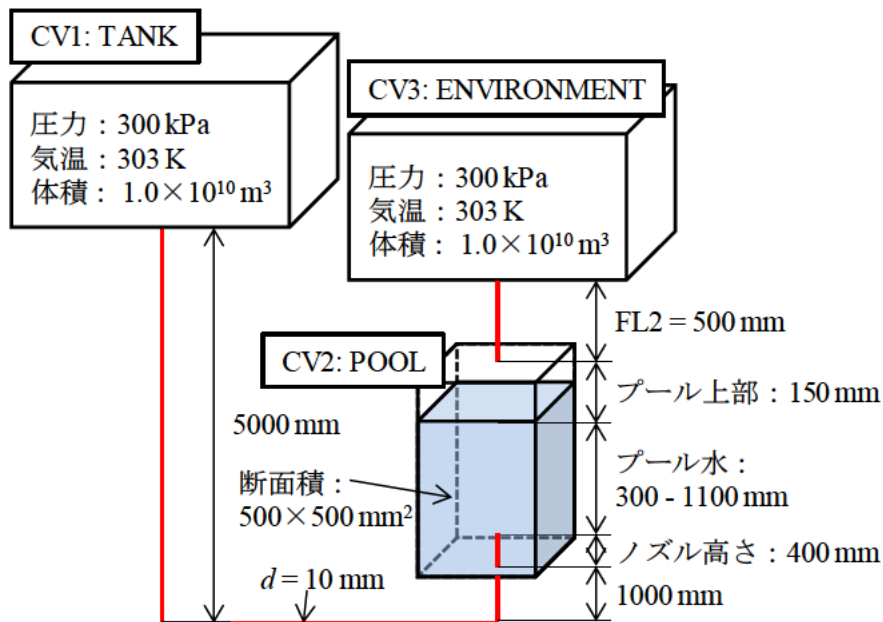


図 3.1 解析体系

表 3-1 解析条件

番号	H26に対応する番号	検証内容	試験流体	蒸気割合	ノズル直径	ノズル部流速	体積流量	サブマージェンス	計算時間	環境の体積	プール上部の体積	CV節点数	粒子径	プール温度	断面積
				%	[mm]	[m/s]	[L/min]	[mm]	[s]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[μm]	[K]	[m <sup>2</sup> ]	
No. 1	No. 45	筑波大学の試験と比較(1)	空気-水	0	10	6.366	30	300	86400	10 <sup>10</sup>	0.0375	1	0.2-1.0	303	0.25
No. 2	No. 46	筑波大学の試験と比較(1)	空気-水	0	10	6.366	30	500	86400	10 <sup>10</sup>	0.0375	1	0.2-1.0	303	0.25
No. 3	No. 47	筑波大学の試験と比較(1)	空気-水	0	10	6.366	30	700	86400	10 <sup>10</sup>	0.0375	1	0.2-1.0	303	0.25
No. 4	No. 48	筑波大学の試験と比較(1)	空気-水	0	10	6.366	30	900	86400	10 <sup>10</sup>	0.0375	1	0.2-1.0	303	0.25
No. 5	No. 49	筑波大学の試験と比較(1)	空気-水	0	10	6.366	30	1100	86400	10 <sup>10</sup>	0.0375	1	0.2-1.0	303	0.25
No. 6	No. 50	筑波大学の試験と比較(2)	蒸気-空気-水	89.3	10	59.418	280	300	86400	10 <sup>10</sup>	0.0375	1	0.2-1.0	303	0.25
No. 7	No. 51	筑波大学の試験と比較(2)	蒸気-空気-水	89.3	10	59.418	280	500	86400	10 <sup>10</sup>	0.0375	1	0.2-1.0	303	0.25
No. 8	No. 52	筑波大学の試験と比較(2)	蒸気-空気-水	89.3	10	59.418	280	700	86400	10 <sup>10</sup>	0.0375	1	0.2-1.0	303	0.25
No. 9	No. 53	筑波大学の試験と比較(2)	蒸気-空気-水	89.3	10	59.418	280	900	86400	10 <sup>10</sup>	0.0375	1	0.2-1.0	303	0.25
No. 10	No. 54	筑波大学の試験と比較(2)	蒸気-空気-水	89.3	10	59.418	280	1100	86400	10 <sup>10</sup>	0.0375	1	0.2-1.0	303	0.25
No. 11	No. 55	筑波大学の試験と比較(3)	蒸気-空気-水	89.3	10	59.418	280	300	86400	10 <sup>10</sup>	0.0375	1	0.2-1.0	373	0.25
No. 12	No. 56	筑波大学の試験と比較(3)	蒸気-空気-水	89.3	10	59.418	280	500	86400	10 <sup>10</sup>	0.0375	1	0.2-1.0	373	0.25
No. 13	No. 57	筑波大学の試験と比較(3)	蒸気-空気-水	89.3	10	59.418	280	700	86400	10 <sup>10</sup>	0.0375	1	0.2-1.0	373	0.25
No. 14	No. 58	筑波大学の試験と比較(3)	蒸気-空気-水	89.3	10	59.418	280	900	86400	10 <sup>10</sup>	0.0375	1	0.2-1.0	373	0.25
No. 15	No. 59	筑波大学の試験と比較(3)	蒸気-空気-水	89.3	10	59.418	280	1100	86400	10 <sup>10</sup>	0.0375	1	0.2-1.0	373	0.25

## 3.2. MELCOR による解析結果

MELCOR による解析結果およびその評価を示す。図 3.2 に本解析で使用した変数の定義を示す。本解析では MELCOR の出力をもとにサブマージェンス  $z = 1100$  mm の各解析条件において各 CV に存在するエアロゾル質量  $M_1, M_2, M_3$  を評価した結果を図 3.3 に示す。解析結果より、解析条件 5 および 15 については全条件においてエアロゾル濃度が各時間において単調増加していく様子が見られた。一方で、解析条件 10 についてはある時間から  $M_1$  におけるエアロゾルの供給がストップし、微粒子の除去が停止した。微粒子の除去が停止した理由については不明である。以上のエアロゾル質量の変化をもとに DF を計算した。DF は以下のように記述される:

$$DF = G_1/G_3. \quad (3-1)$$

ここで,

$$G_1 = (G_1 - G_2) + (G_2 - G_3) + G_3 = \frac{d}{dt}(M_1 + M_2 + M_3), G_3 = \frac{d}{dt}(M_3), \quad (3-2)$$

であるから、DF はエアロゾル質量を用いて以下のように記述される:

$$DF = \frac{d(M_1 + M_2 + M_3)}{dt} / \frac{dM_3}{dt}. \quad (3-3)$$

$G_1$  [kg/s]: プール部水中に流入するエアロゾル質量

$G_2$  [kg/s]: プール部水中からプール部雰囲気中に流入するエアロゾル質量

$G_3$  [kg/s]: 雰囲気中に流入するエアロゾル質量

$M_1$  [kg]: CV2 のうち水中に存在するエアロゾル質量

$M_2$  [kg]: CV2 のうち雰囲気中に存在するエアロゾル質量

$M_3$  [kg]: CV3 に存在するエアロゾル質量

MELCOR が出力した DF と質量をもとに算出した DF の比較結果を図 3.4 に示す。解析結果からは DF が解析条件 5 および 15 については良く一致していることが示された。解析条件 10 についてはエアロゾルの流入が停止するまでは良い一致がみられるものの、流入量が 0 となってからは値が一定値をとることが分かる。

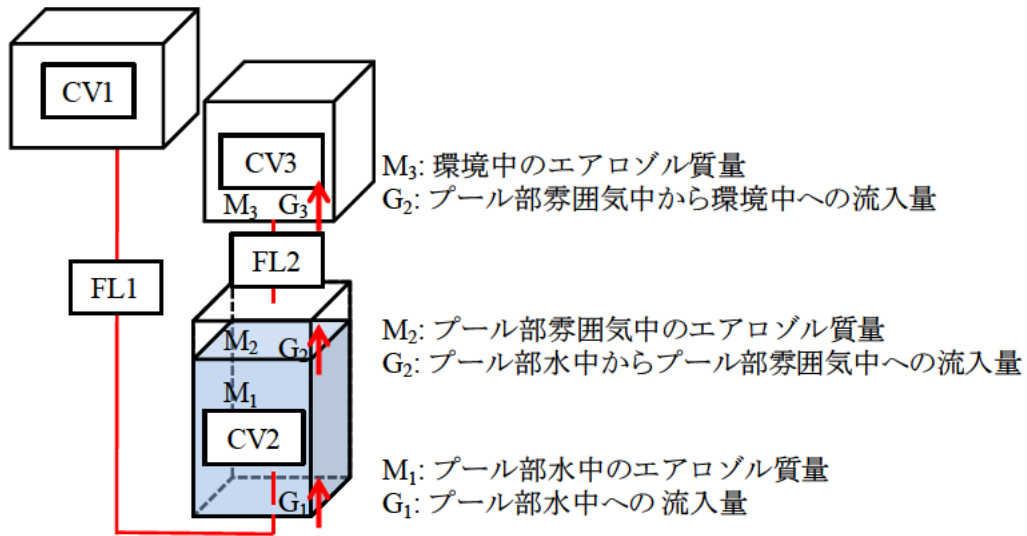


図 3.2 各変数の定義

**解析条件5**

CV2

気温: 303 K

水温: 303 K

空気流量: 30 L/min

上記流量: 0 L/min

**解析条件10**

CV2

気温: 373 K

水温: 303 K

空気流量: 30 L/min

上記流量: 250 L/min

**解析条件15**

CV2

気温: 373 K

水温: 373 K

空気流量: 30 L/min

上記流量: 250 L/min

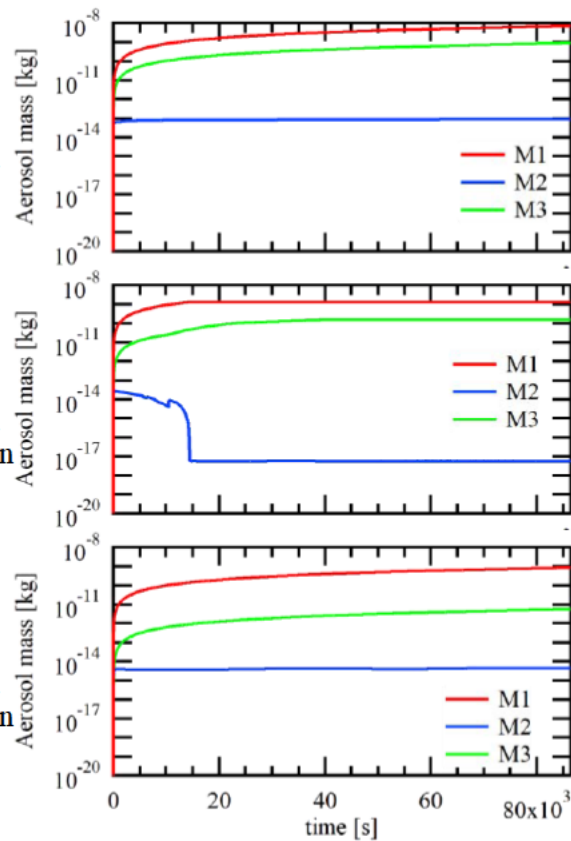


図 3.3 各解析条件におけるエアロゾル質量の時間推移 ( $z = 1100$  mm)

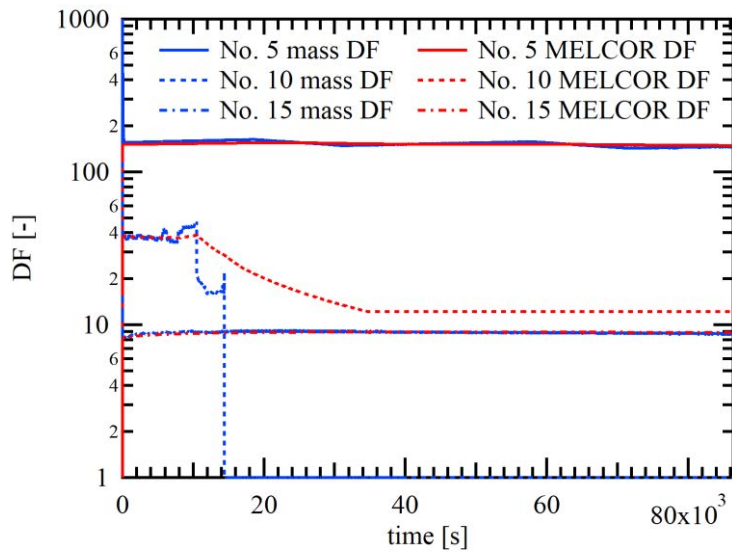


図 3.4 MELCOR が出力した DF と算出した DF の比較 ( $z = 1100 \text{ mm}$ )

解析体系の内部における蒸気が DF に及ぼす影響を調べるため、プール水温に着目した結果を図 3.5 に示す。赤の実線が解析条件 No. 5、青の点線が解析条件 No. 10、緑の一点鎖線が解析条件 No. 15 をそれぞれ示す。また、飽和温度を黒い実験で示す。No. 15 は解析条件ではプール水温とガス温度が  $373 \text{ K}$  であるが、解析が始まるとわずかに低下する傾向がみられる。これは、CV 外部にとの熱のやり取りが生じているためと考えられる。また、初期プール水温の低い No. 10 については流入する気相の温度により徐々に液温が上昇し、やがて平衡に達する様子が見られた。以上をもとに、各条件でプール水を通る前の FL1 とプール水を通った後の FL2 で水の流量(液相+蒸気+湯気)の質量変化を図 3.6 に示す。赤線は FL1 の値、青線は FL2 の値、実線で解析条件 No. 5、点線で解析条件 No. 10、一点鎖線で解析条件 No. 15 の解析結果をそれぞれ示す。解析条件 No. 5 においては蒸気を投入していないため、FL1 および FL2 で水の質量はほぼ 0 に等しい。一方で、ともに  $250 \text{ L/min}$  の蒸気流量の解析条件 No. 10 および No. 15 についてはほぼ同量の水が流入しているものの、より液相温度が飽和温度に近い解析条件 No. 15 においては No. 10 と比較して FL2 における水の質量が多い傾向がみられた。また、解析ではともに飽和温度に達していない条件であっても無視できない量の蒸気が凝縮せずに液面に到達することが示された。

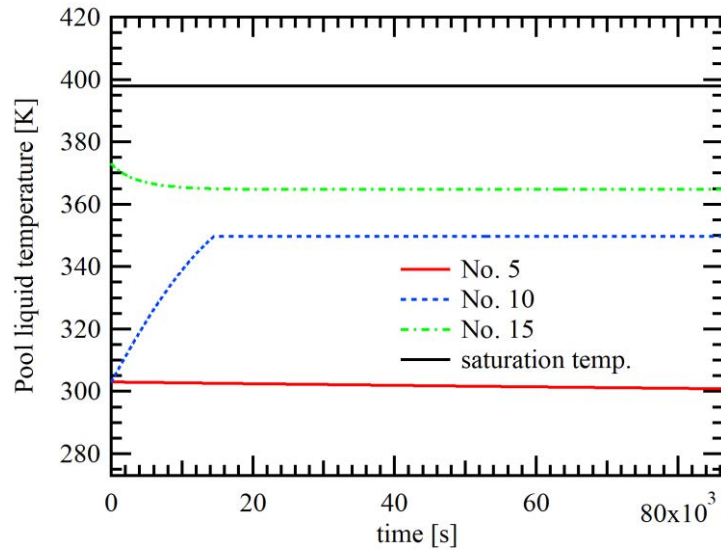


図 3.5 各解析条件におけるプール水温と飽和温度の比較 ( $z = 1100$  mm)

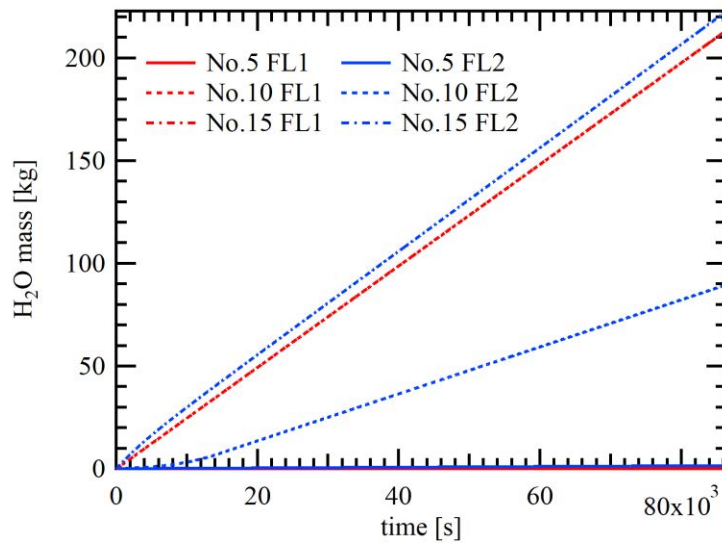


図 3.6 各解析条件におけるフローパスの水質量の推移 ( $z = 1100$  mm)

各条件の解析結果におけるサブマージェンスごとの DF の出力結果を図 3.7 に示す。DF はともに値が十分に安定した 24 時間後の値を用いた。解析結果からはすべての条件において DF が対数軸に対して一定に上昇する傾向がみられた。また、蒸気凝縮の生じない No. 1-5 の条件において DF が最も大きく、蒸気流量および液温を挙げた No. 11-15 の条件において DF が最も低くなることが示された。この原因は、図 3.6 に示す各条件における蒸気凝

縮量から説明できる。通常であれば，蒸気凝縮により微粒子の除染は促進されるが，蒸気の多くが凝縮しないまま液面に到達することでプール水中における気相の見かけ流量が大きくなり，スウォームの速度が上昇することで除染時間が短くなったことで除染時間の現象が蒸気凝縮による DF 増加の影響を上回ったことが原因と考えられる。

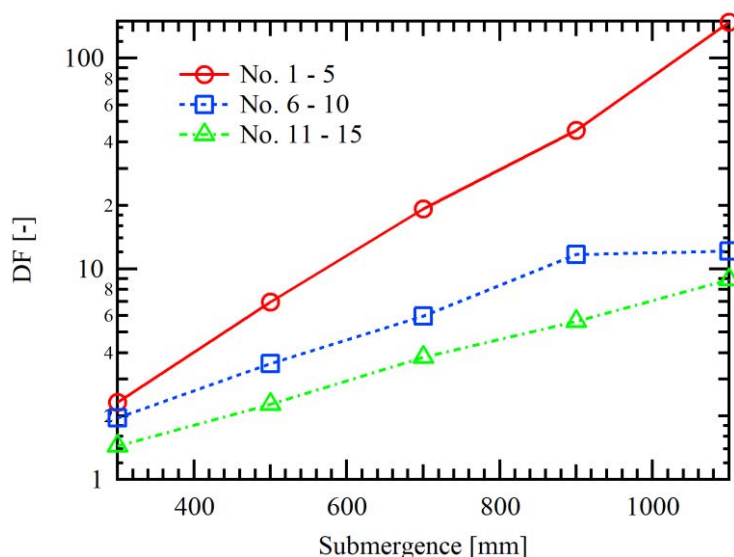


図 3.7 各解析条件におけるサブマージェンスごとの DF 解析結果

### 3.3. 筑波大学の二相流実験と解析結果の比較

図 3.8 には表 3-1 の条件 No.1 から No.5 の DF 解析結果と 2.2.4 項に示した DF 計測結果とをサブマージェンスに対して粒径ごとに比較した。粒径ごとに比較すると解析結果が計測結果を明らかに上回る傾向となった。MELCOR の解析では低サブマージェンスから対数軸に対して線形に上昇しており，粒径によらずこの傾向がみられる。

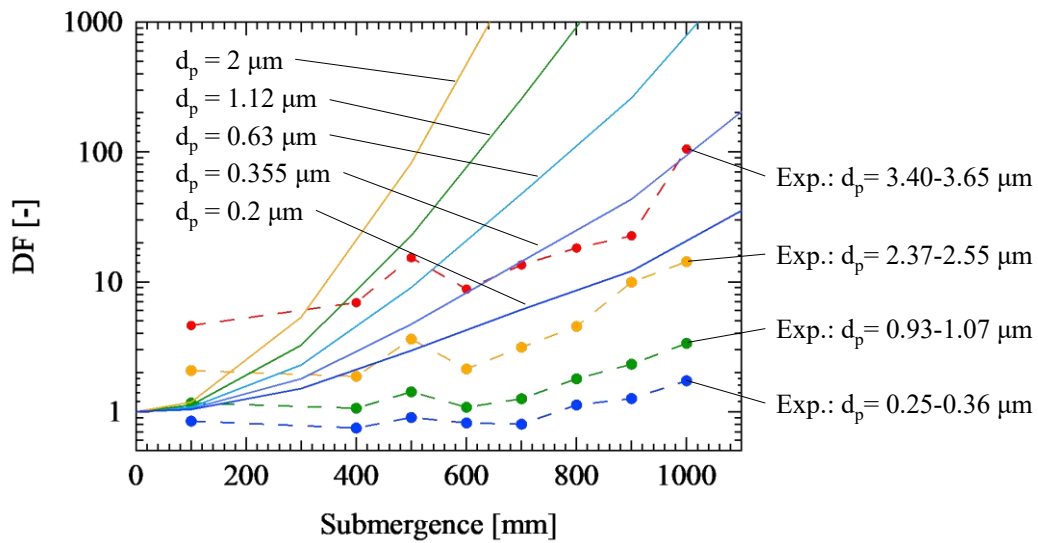


図 3.8 実験結果および解析結果の粒径ごとの DF の比較

図 3.9 には蒸気-空気混合ガスを用いた DF 計測結果と表 3-1 の条件 No.6 から No.10 までの MELCOR による解析結果とを比較したものである。解析結果に比べて計測結果は非常に高い値となった。MELCOR の二相流モデルでは流動については水温が考慮されておらず、グローブユールの分裂とともに徐々に蒸気は凝縮していく。一方、実際の現象では高サブクール条件ではノズル出口での直接接触凝縮により急激に凝縮が進む。このような実現象と二相流モデルとの相違が大きな誤差の一因となったと考えられる。

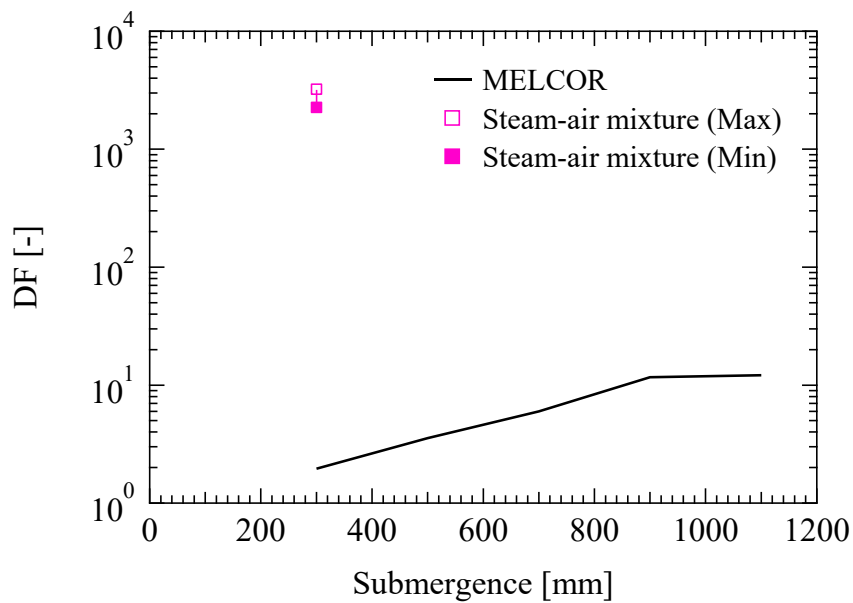


図 3.9 実験および MELCOR 解析による蒸気-空気混合条件にける DF の比較



図 2.37 (a)において CsI を用いて計測したインレット流量 30 L/min での各粒径における DF と表 3-1 No.2, 4 および No.1-4 同様にサブマージェンスを 100 mm として解析した結果と比較したものを図 3.10 に示す. 粒径の増加に伴う DF の上昇傾向は一致するものの, MELCOR と比較して実験結果ではサブマージェンスの影響は少ないことが分かった. 特に低水深なサブマージェンス 100 mm では MELCOR が DF を過小評価, サブマージェンス 900 mm においては MELCOR が DF を過大評価していることがわかった.

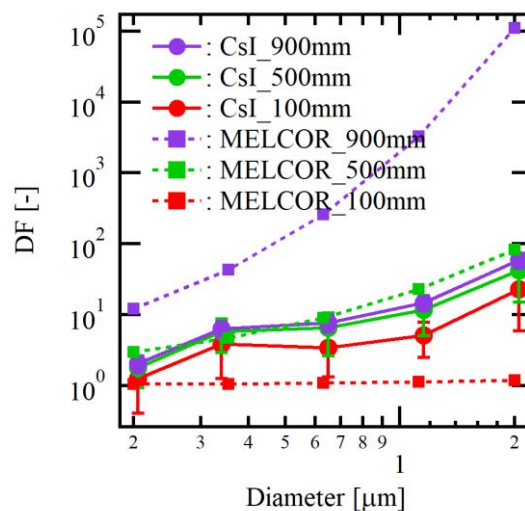


図 3.10 実験結果および解析結果のサブマージェンスごとの DF の比較

図 3.11 にインレット流量 30 L/min における CsI およびシリカの粒径 0.3 μm における DF および図 1.24 で計測された CsI を用いた単一気泡実験における粒径 0.3 μm における DF, MELCOR におけるインレット流量 30 L/min の粒径 0.3 μm における DF を比較したものを示す. サブマージェンス 100 mm 付近の低水深領域ではインレット流量 30 L/min での実験結果のほうが単一気泡の低水深(サブマージェンス 200 mm 付近)の結果よりも高いことが分かる. 流量 30 L/min のほうがインレットにおける気液界面で, 気相流速が速いためエアロゾルの慣性衝突による除去に起因していると考えられる. 一方でサブマージェンス 800 mm 付近では単一気泡のほうが流量 30 L/min での DF よりも高くなっている. これは図 2.26 に示すように単一気泡のほうが流量 30 L/min の気液二相流よりも気相流速が遅く, 除染時間が長くなるためだと考えられる. また同じインレット流量 30 L/min において実験結果と MELCOR の解析結果が異なることがわかった. 低水深(サブマージェンス 100 mm 付近)では実験結果が MELCOR の解析結果よりも高くなっており, 図 2.26 において MELCOR は低水深領域において気相流速を過小評価しているため, 除染時間を過小評価していることに起

因すると考えられる。一方で高水深(サブマージェンス 900 mm 付近)では MELCOR が DF を過大評価していることがわかった。これは図 2.19, 図 2.20 において示されたように下流にて MELCOR の想定以上に大気泡が残存しており, 大気泡が高濃度のエアロゾルを搬送しているためであると考えられる。さらに, 単一気泡実験の DF のほうが MELCOR の流量 30 L/min の結果に一致している傾向にある。単一気泡における DF は MELCOR においてスウォーム上昇領域における DF を表しているため, 図 2.19 より MELCOR では実験よりも低水深の段階で完全にスウォーム上昇領域となっており, スウォーム上昇領域を過大評価しているために下流で DF を過大評価していると考えられる。

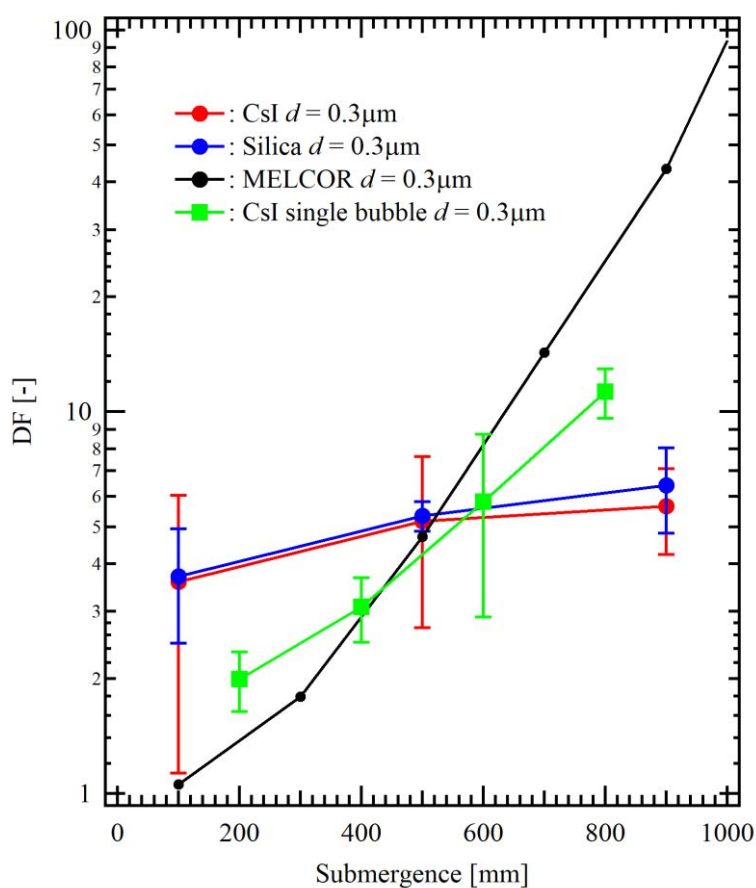


図 3.11 単一気泡実験, 二相流実験および MELCOR による DF との比較

## 文献目録

- [1] K. Fujiwara, W. Kikuchi, Y. Nakamura, S. Saito, T. Yuasa, A. Kaneko and Y. Abe, "Experimental study of single-bubble behavior containing aerosol during pool scrubbing," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 348, pp. 159–168, 2019.
- [2] Y. Bian, F. Dong, W. Zhang, H. Wang, C. Tan, and Z. Zhang, "3D reconstruction of single rising bubble in water using digital image processing and characteristic matrix," in *Particuology*, vol. 11, no. 2, pp. 170–183, 2013.
- [3] A. Tomiyama, G. P. Celata, S. Hosokawa, and S. Yoshida, "Terminal velocity of single bubbles in surface tension force dominant regime," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 29(9), pp. 1497-1519, 2002.
- [4] D. D. Paul, D. C. Newman and R. A. Cudnik, "Gas-Liquid Hydrodynamics of Large Vent/Suppression Pool Systems of Nuclear Power Plants during Some Accident Conditions," Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 1985.
- [5] Auvinen and J. Ball, "State of the art report on nuclear aerosols Organisation de Coopération et de Développement Économiques NEA / CSNI / R (2009) 5 Unclassified," 2009.
- [6] S. A. Ramsdale, G. J. Bamford, S. Fishwick and H. C. Starkie, "Status of Research and Modeling of Water-Pool Scrubbing, Final Report," Commission of the European Communities, Directorate-General XIII, EUR 14566 EN, 1992.
- [7] T. Kanai, M. Furuya, T. Arai and Y. Nishi, "Development of an aerosol decontamination factor evaluation method using an aerosol spectrometer," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 303, pp. 58-67, 2016.
- [8] A. Dehbi, D. Suckow and S. Guentay, "Aerosol retention in low-subcooling pools under realistic accident conditions," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 203, pp. 229-241, 2001.
- [9] R. Clift, J. R. Grace and M. E. Weber, "Bubbles, Drops, and Particles," Courier Corporation, 1978.
- [10] T. Kreis, "Digital holographic interference-phase measurement using the Fourier-transform method," *JOSA A*, vol. 3(6), pp. 847-855, 1986.
- [11] K. Fujiwara, Y. Nakamura, W. Kikuchi, A. Kaneko, and Y. Abe, "Measurement of particle decontamination behavior using interferometer," *Exp. Fluids*, vol. 61, no. 2: 37, 2020.
- [12] J. W. Goodman, "Introduction to Fourier optics," Roberts and Company Publishers, 2015.
- [13] H. M. Prasser and R. Häfeli, "Signal response of wire-mesh sensors to an idealized bubbly flow," *Nuclear Engineering and Design*, 336, pp.3-14, 2018.
- [14] K. Hashimoto, K. Soda, S. Uno, H. Nakatani and H. Takeoka, "Effect of Pool Scrubbing of Insoluble Aerosol in Two Phase Flow in a Pipe," IAEA-SM-296/60, 1988.

- [15] Hakii, J., Kaneko, I., Fukusawa, M., Yamashita, M., Matsumoto, M., 1990. Experimental study on aerosol removal efficiency for pool scrubbing under high temperature steam atmosphere. In: Proc. 21<sup>st</sup> DOE/NRC Nuclear Air Cleaning Conference.
- [16] L. E. Herranz, Vi. Peyrés, J. Polo, M. J. Escudero, M. M. Espigares and J. -Jiménez, "Experimental and Analytical Study on Pool Scrubbing Under JET Injection Regime," Nuclear Technology, vol. 120(2), pp. 95-109, 1997.
- [17] Uchida, S., Itoh, A., Naitoh, M., Okada, H., Suzuki, H., Hanamoto, Y., Osakabe, M., Fujikawa, M., 2016. Temperature dependent fission product removal efficiency due to pool scrubbing. Nucl. Eng. Des. 298, 201–207.
- [18] Paul, D.D., Flanigan, L.D., Cunnane, J.C., Cudnik, R.A., Collier, R.P., Ohlberg, R.N., "Radionuclide scrubbing in water pools–gas-liquid hydrodynamics", ANS Topical Meeting, Snowbird, Utah, July 15–19, 1984, NP-4113-SR, 1985.
- [19] N. Zuber and J. Findlay, Average volumetric concentration in two-phase flow systems., Journal of heat transfer, vol.87(4), pp.453-468,1965.



**リサイクル適性** 

この印刷物は、印刷用の紙へ  
リサイクルできます。