

平成 30 年度原子力規制庁委託成果報告書

スクラビング個別効果試験に関する研究
(平成 30 年度分)

筑波大学
平成 31 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. 委託業務題目	1
2. 業務委託の目的	1
3. 委託業務の内容	1
4. 単一気泡中のエアロゾル挙動測定実験	2
4.1. 実験装置の改造及び実験実施	2
4.2. 実験データの整理	2
4.3. 本研究で着目するパラメータ	6
4.3.1. 本研究が対象とする MELCOR におけるプールスクラビングモデルの概要	6
4.3.2. 着目パラメータとそれらを計測するための実験計画	8
4.4. 実験装置および実験手法	11
4.4.1. 単一気泡可視化実験装置の概要	11
4.4.2. 単一気泡実験装置におけるエアロゾル微粒子および発生手法の検討	12
4.4.3. 油滴内部流動可視化実験の概要	13
4.4.4. 干渉計実験装置の概要	14
4.5. 単一気泡上昇挙動可視化実験	16
4.5.1. エアロゾルを含む単一気泡の可視化実験	16
4.5.2. エアロゾルを含む単一気泡の上昇速度	20
4.5.3. 既存のモデルと上昇速度の計測結果の比較	21
4.5.4. エアロゾルを含む単一気泡の形状	23
4.5.5. 既存のモデルとアスペクト比の計測結果の比較	23
4.6. 油滴を用いた内部流動可視化実験	25
4.6.1. 油滴の可視化計測	25
4.6.2. 局所二次元速度場の計測	25
4.6.3. 局所遠心力速度の計算	27
4.7. 微粒子除染現象可視化実験	31
4.7.1. 不溶性微粒子による微粒子除染現象の可視化	31
4.7.2. 干渉計による微粒子除染現象の可視化	33
4.7.3. フーリエ変換法および機械学習による微粒子除染現象の計測	34
4.7.4. 気泡界面における微粒子除染現象の計測	34
4.7.5. 干渉計実験装置における速度場計測技術の検討	36
4.7.6. 干渉計による速度場および濃度場の同時計測	40
4.8. 微粒子除染現象および内部流動の考察	42
4.9. 単一気泡中のエアロゾル挙動測定実験のまとめ	43
5. 気泡の二相流挙動評価実験	45

5.1.	実験装置の改良及び実験実施	45
5.2.	実験データの整理	45
5.2.1.	二相流実験基本仕様について	45
5.2.2.	本研究で対象としている二相流流動現象	46
5.2.3.	着目パラメータとそれらを計測するための実験計画	47
5.3.	二相流実験装置および実験手法	48
5.3.1.	二相流実験装置の概要	48
5.3.2.	本年度行った二相流実験装置の改造	49
5.3.3.	ワイヤメッシュセンサ	50
5.3.4.	エアロゾル計測	53
5.3.5.	高速度カメラによる可視化	56
5.4.	エアロゾルを含まない気液二相流実験	58
5.4.1.	エアロゾルを含まない二相流実験について	58
5.4.2.	気相噴流の可視化	58
5.4.3.	気泡アスペクト比の計測結果の比較	59
5.4.4.	ワイヤメッシュセンサによるボイド率および気相速度の計測	60
5.4.5.	気泡径分布計測結果の比較	62
5.4.6.	気泡径分布データに対する評価方法の検討	64
5.4.7.	気泡径分布評価結果	66
5.4.8.	気泡径に関する MELCOR との比較	69
5.4.9.	温度成層化実験	70
5.5.	エアロゾルを用いた二相流実験	72
5.5.1.	可溶性粒子使用結果	72
5.5.2.	粒子性質の流動への影響評価	72
5.5.3.	噴流における平均ボイド率評価	74
5.5.4.	噴流における平均気相速度評価	75
5.5.5.	気泡形状評価	76
5.5.6.	可溶性エアロゾル濃度による影響	80
5.5.7.	計測時間妥当性評価	81
5.5.8.	WMS 気泡形状計測妥当性評価	82
5.5.9.	エアロゾルが WMS に与える伝導率影響評価	84
5.5.10.	気泡内除染係数評価	85
5.5.11.	気泡界面に向かう粒子の速度	86
5.5.12.	気泡内での除染係数評価	91
5.5.13.	グローブール領域評価	93
5.5.14.	水-空気条件での移行挙動	93

5.5.15.	水-空気系における慣性衝突による除染係数評価.....	96
5.5.16.	水-蒸気条件での移行挙動.....	98
5.5.17.	水-蒸気系における凝縮による除染係数評価.....	103
5.5.18.	薄型水槽妥当性確認.....	103
5.5.19.	エアロゾル計測器を用いた DF 評価.....	105
5.5.20.	スクラビングによる粒径分布変化.....	105
5.5.21.	プール全領域における DF_{OVi} 評価.....	110
5.5.22.	プール全領域における DF_{OVi} の算出.....	110
5.5.23.	サブマージェンスに対する DF_{OVi}	112
5.6.	気泡の二相流挙動評価実験に関するまとめ.....	114
6.	MELCOR による DF 解析.....	115
6.1.	プールスクラビングによる DF 解析の概要.....	115
6.2.	プールスクラビングに関する流動モデル概要.....	116
6.3.	プールスクラビングに係る除染モデル概要.....	118
6.4.	解析体系および解析条件.....	119
6.5.	Hakii らの実験に対応するプールスクラビング解析.....	122
	文献目録.....	130

図目次

図 4-1	単一気泡実験装置系統図	4
図 4-2	単一気泡による DF 測定試験 試験部.....	5
図 4-3	MELCOR モデルにおいて想定される二相流挙動.....	10
図 4-4	MELCOR モデルにおいて想定される単一気泡中流動	10
図 4-5	気泡形状可視化実験装置	11
図 4-6	湿式エアロゾル発生装置により生成したエアロゾルの粒径	12
図 4-7	油滴内部流動可視化実験装置.....	13
図 4-8	本研究において開発した二波長干渉計の光路図.....	14
図 4-9	除染現象可視化実験において使用したテストセクションの模式図.....	15
図 4-10	不溶性微粒子条件における気泡挙動の可視化結果 ($d = 3 \text{ mm}, z = 0 \text{ mm}$) .	16
図 4-11	可溶性微粒子条件における気泡挙動の可視化結果 ($d = 3 \text{ mm}, z = 0 \text{ mm}$)..	17
図 4-12	不溶性微粒子条件における気泡挙動の可視化結果 ($d = 3 \text{ mm}, z = 200 \text{ mm}$)	17
図 4-13	可溶性微粒子条件における気泡挙動の可視化結果 ($d = 3 \text{ mm}, z = 200 \text{ mm}$)	18
図 4-14	不溶性微粒子条件における気泡挙動の可視化結果 ($d = 3 \text{ mm}, z = 400 \text{ mm}$)	18
図 4-15	可溶性微粒子条件における気泡挙動の可視化結果 ($d = 3 \text{ mm}, z = 400 \text{ mm}$)	19
図 4-16	不溶性微粒子条件における気泡挙動の可視化結果 ($d = 3 \text{ mm}, z = 600 \text{ mm}$)	19
図 4-17	可溶性微粒子条件における気泡挙動の可視化結果 ($d = 3 \text{ mm}, z = 600 \text{ mm}$)	20
図 4-18	各粒子条件 (No particle, OX50, BaSO ₄ , CsI)における気泡上昇速度の比較	21
図 4-19	各粒子条件 (No particle, OX50, BaSO ₄ , CsI)における気泡上昇得度と MELCOR における気泡上昇速度の比較	22
図 4-20	各粒子条件 (No particle, OX50, BaSO ₄ , CsI)における気泡アスペクト比の比 較.....	23
図 4-21	各粒子条件 (No particle, OX50, BaSO ₄ , CsI)における気泡アスペクト比と MELCOR における気泡アスペクト比の比較	24
図 4-22	FLUOSTAR を投入した条件における油滴内部流動の可視化結果 ($d = 10$ mm).....	25
図 4-23	油滴内部流動の画像処理結果 (背景除去, および重心座標一定座標変換).	26
図 4-24	油滴内部流動 PIV 計測結果 (画像処理後に計測を行った場合)	26

図 4-25	気泡内部の流跡線可視化結果および MELCOR が想定する流動の比較	26
図 4-26	油滴の内部における瞬時流跡線	27
図 4-27	本研究において用いた気泡界面速度場計測の画像処理手法	27
図 4-28	油滴内部流動における速度場の平均値から得られた界面速度 V_S の計測結果 (Blue line: 可視化実験により得られた速度; Red line: MELCOR における速度)	28
図 4-29	気泡計測における各パラメータの定義	29
図 4-30	油滴内部流動における速度場の平均値から得られた遠心力による物質移動 係数 $V_{e,i}$ の計測結果	29
図 4-31	瞬時速度場情報から得られた界面速度 V_S および遠心力による物質移動係数 $V_{e,i}$	30
図 4-32	Rhodamine B で着色した OX50 粒子を投入した条件における気泡挙動の可 視化結果 ($d = 3$ mm) 撮影条件: Shutter speed: 0.156ms, Frame rate: 6400fps, Resolution: 768×768	31
図 4-33	気泡の界面から流出した微粒子以外の背景差分処理結果	31
図 4-34	気泡から除染された微粒子の速度場計測結果	32
図 4-35	定常上昇する気泡の界面から離脱するエアロゾルの可視化結果 ($d = 3$ mm) 撮影条件: Shutter speed: 0.156ms, Frame rate: 6400fps, Resolution: 768×768	32
図 4-36	明視野計測可視化結果 (wavelength = 600 nm; 干渉縞本数 18 本; $d = 3$ mm) 撮影条件: Shutter speed: 0.25ms, Frame rate: 4000fps, Resolution 1280×1024	33
図 4-37	干渉縞計測可視化結果 (wavelength = 532 nm; 干渉縞本数 18 本; $d = 3$ mm) 撮影条件: Shutter speed: 0.125ms, Frame rate 4000fps, Resolution 1280×1024	33
図 4-38	気泡から除染された微粒子の位相場計測結果	34
図 4-39	気泡か気泡界面の位相場計測における偏角 θ の定義	35
図 4-40	気泡の界面における微粒子の位相場計測結果	35
図 4-41	気泡の界面における微粒子位相場の時間平均	36
図 4-42	位相および速度場の同時可視化計測に用いた光学系	36
図 4-43	本光学系で用いたダイクロイックミラーの分光特性評価	37
図 4-44	ダイクロイックミラーを用いた蛍光粒子および気泡挙動の可視化	38
図 4-45	ダイクロイックミラーを用いた条件における干渉縞の可視化	38
図 4-46	ダイクロイックミラーおよびプリズムの光路の違い	38
図 4-47	本光学系で用いたダイクロイックプリズムの分光特性評価	39
図 4-48	ダイクロイックプリズムを用いた蛍光粒子および気泡挙動の可視化	40
図 4-49	ダイクロイックプリズムを用いた条件における干渉縞の可視化	40
図 4-50	ダイクロイックプリズムを用いた気泡周囲における流動の計測結果	41

図 4-51	速度場と同時に位相場を計測した結果	41
図 4-52	気泡の界面における微粒子の位相場差分値の絶対値の平均および遠心力による物質移動係数 $V_{c,i}$ の比較 (phase: green plot, centrifugal velocity: red plot)	42
図 5-1	二相流実験装置外観	48
図 5-2	二相流実験系統図	49
図 5-3	新たに新設した気体加熱器	50
図 5-4	ワイヤメッシュセンサ	51
図 5-5	WMS の概念図	52
図 5-6	エアロゾル計測の実験体系	53
図 5-7	エアロゾル計測原理_概念図	54
図 5-8	濃度を概算するための計算体系	55
図 5-9	エアロゾル濃度範囲	56
図 5-10	バックライト法による可視化手法	57
図 5-11	薄型水槽を用いた可視化装置	57
図 5-12	空気噴流 (空気流量 : 10 L/min, 水温 : 約 85°C) および蒸気-空気混合噴流 (空気流量 : 10 L/min, 蒸気流量 : 266 L/min, 水温 : 約 85°C) の可視化画像	58
図 5-13	ノズル先端における噴流の可視化画像	59
図 5-14	アスペクト比計測に用いた可視化画像	59
図 5-15	画像から算出したアスペクト比の比較結果	60
図 5-16	$z=300, 700$ mm における平均ボイド率分布	61
図 5-17	$z = 300, 700$ mm における平均気相速度分布	62
図 5-18	サブクール度 15-20 K で計測した気泡径分布	63
図 5-19	サブクール度 2-5 K で計測した気泡径分布	63
図 5-20	気泡体積平均径の推移	64
図 5-21	サブクール度 15-20 K 条件における体積加重気泡径分布	65
図 5-22	噴流中に微細化せずに残留する気泡の可視化	65
図 5-23	混合ガウスモデルによるフィッティング処理結果	66
図 5-24	サブクール度 15-20 K 条件における気泡径データに対するフィッティング結果	67
図 5-25	サブクール度 2-5 K 条件における気泡径データに対するフィッティング結果	67
図 5-26	空気流量 $Q_{air} = 10$ L/min で一定の条件における体積平均径の変化	67
図 5-27	サブクール度 15-20 K で一定の条件における体積平均径の変化	68
図 5-28	空気流量 $Q_{air} = 10$ L/min で一定の条件における蒸気流量増加に伴う体積平均径の減少率の比較	68

図 5-29	サブクール度 15–20 K で一定の条件における蒸気流量増加に伴う体積平均径の減少率の比較	69
図 5-30	空気流量 $Q_{air} = 10 \text{ L/min}$ で一定の条件における体積平均径と MELCOR の相関式との比較	70
図 5-31	サブクール度 15–20 K で一定の条件における体積平均径と MELCOR の相関式との比較	70
図 5-32	温度成層化に関する温度推移計測体系	71
図 5-33	高さ方向の温度計測結果	71
図 5-34	ノズル入口エアロゾル濃度	72
図 5-35	粒子性質の流動構造への影響(50 L/min)	73
図 5-36	各ノズルからの距離における噴流ボイド率	74
図 5-37	各ノズルからの距離における噴流気相速度	75
図 5-38	ノズルから各距離における気泡径とアスペクト比の関係	78
図 5-39	WMS によって算出された気泡径, アスペクト比分布	79
図 5-40	時間あたりの個数濃度変化	80
図 5-41	エアロゾルの濃度の違いによるボイド率, 気相速度	81
図 5-42	計測時間の妥当性評価	82
図 5-43	WMS, 画像処理による気泡径とアスペクト比の関係	83
図 5-44	WMS, 画像処理における気泡径分布の差	83
図 5-45	エアロゾルの WMS への影響	84
図 5-46	MELCOR モデルにおいて想定される単一気泡中流動	89
図 5-47	MELCOR 及び実験値における各粒子の気泡界面速度	90
図 5-48	実験値, MELCOR におけるサブマージェンスごとの $DF_{BB,i}$	91
図 5-49	$DF_{BB,i}$ に関する各種パラメータの影響	92
図 5-50	水-空気系における移行挙動	94
図 5-51	水-空気系における速度分布	95
図 5-52	水-空気条件における慣性衝突による移行	97
図 5-53	水-空気系におけるノズル直後速度, 及び慣性衝突による $DF_{II,i}$ 結果	98
図 5-54	水-蒸気系における移行挙動	99
図 5-55	水-蒸気系における速度分布	100
図 5-56	水-蒸気条件における慣性衝突による移行	101
図 5-57	水-蒸気系におけるノズル直後速度, 及び慣性衝突による $DF_{II,i}$	102
図 5-58	蒸気凝縮による移行挙動	103
図 5-59	軸対称噴流と薄型水槽噴流の比較結果	104
図 5-60	不溶性粒子を用いたスクラビング前後のエアロゾル粒径分布	106
図 5-61	サブマージェンスによるエアロゾル除去量	107

図 5-62	不溶性粒子を用いた条件におけるスクラビング前後の粒子減少率.....	108
図 5-63	各サブマージェンスにおける水面可視化結果水-蒸気系における慣性衝突による除染係数評価	109
図 5-64	DF 計測結果.....	111
図 5-65	不溶性粒子を用いた条件における各粒径における $DF_{ov,i}$ 評価	112
図 5-66	不溶性エアロゾルを用いた条件におけるサブマージェンスに対する $DF_{ov,i}$ 評価結果	113
図 6-1	エアロゾルの質量分布 [MELCOR Computer code manuals (1.8.5)].....	116
図 6-2	SPARC-90 における流動モデル	117
図 6-3	SPARC-90 における気泡モデル	117
図 6-4	SPARC-90 における除染モデル	118
図 6-5	解析体系.....	119
図 6-6	各ボリューム中のエアロゾル質量.....	123
図 6-7	各ボリューム間のエアロゾル質量流量	123
図 6-8	質量流量から求めた除染係数と粒子径ごとの DF の解析結果	124
図 6-9	ガス流量が及ぼす DF への影響の時系列変化.....	125
図 6-10	ガス流量が及ぼす DF への影響	125
図 6-11	サブマージェンスが及ぼす DF への影響の時系列変化	126
図 6-12	サブマージェンスが及ぼす DF への影響.....	127
図 6-13	気相蒸気割合が及ぼす DF への影響の時系列変化	129
図 6-14	気相蒸気割合が及ぼす DF への影響.....	129

表目次

表 4-1	単一気泡による DF 測定試験基本仕様.....	3
表 4-2	本研究で着目するパラメータ	9
表 4-3	気泡可視化実験で使った流体の物性	11
表 4-4	気泡の内部に混入した微粒子の物性.....	12
表 4-5	油滴内部流動の可視化実験に用いた流体の物性.....	13
表 5-1	気泡の二相流実験基本仕様.....	46
表 5-2	実験一覧.....	47
表 5-3	エアロゾルスペクトロメーター仕様.....	54
表 5-4	エアロゾルジェネレーター仕様	56
表 5-5	気泡内 DF におけるパラメータ	86
表 6-1	解析体系の主要なパラメータの入力値	120
表 6-2	エアロゾルの入力値	120
表 6-3	解析条件.....	121

1. 委託業務題目

平成 30 年度原子力施設棟防災対策費（スクラビング個別効果試験）事業

2. 業務委託の目的

BWR の重大事故では、ウェットウェルからの格納容器ベントを実施する際には、プール水中におけるスクラビング効果により核分裂生成物の除去効果が期待できる。しかし、福島第一原子力発電所事故においては、高温での急減圧により沸騰が発生し、必ずしも期待された効果が得られず、環境への放出量を増加させた可能性がある。これらのプール水中のスクラビング効果は PWR の蒸気発生器中の細管破断のような事故を含め、核分裂生成物が水中に放出される種々の状況において発生する。重大事故発生時の環境へ放出する核分裂生成物量を正確に評価するための解析手法を開発する観点から、高温急減圧条件下等を含む幅広い条件のプール水におけるスクラビングによる核分裂生成物除去効果を定量的に評価する必要がある。加えて、現状のスクラビングに関する研究は、前述のプール水の減圧沸騰条件に加え、プール水へ流入するガスの非凝縮性ガス割合の幅広い条件範囲における、エアロゾル挙動及び二相流挙動、さらに双方の詳細な相互関係についての知見が不十分である。このため、スクラビングを解析的に評価する場合に使用するモデルの高度化又は妥当性確認への試験データの活用が困難な状況となっている。

本事業では、スクラビング時に生じる種々の現象を個別に分離し、これらについて段階的に実験を実施することで、気泡とエアロゾル挙動の相互関係を詳細に調べ、核分裂生成物の除去効果を定量的に評価するための基礎データの取得を目指す。

3. 委託業務の内容

原子炉施設におけるスクラビング時に生じる現象を個別に分離可能な実験を段階的に実施することで、気泡とエアロゾル挙動の相互関係を詳細に調べ、核分裂生成物の除去効果を定量的に評価するための基礎データを取得する。また、解析コード内モデルの妥当性検証および必要に応じてモデルを改良する。

4. 単一気泡中のエアロゾル挙動測定実験

本研究においては平成 30 年度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）の試験実施要領において定められる，以下 4.1 節及び 4.2 節の内容について試験を行った。

4.1. 実験装置の改造及び実験実施

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。表 4-1 に実験の基本仕様を示す。また，図 4-1 に実験装置の概略図，図 4-2 に実験部の概略図を示す。図 4-2 に示すように，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，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。本研究においては幅広い条件での気泡及びエアロゾル挙動の観察を行い，データを採取する。

今年度は昨年度までに整備した実験装置を改造し，昨年度までに得られた知見及び確立した多次元計測技術等を用い，気泡界面挙動とエアロゾル挙動，加えて気泡内部流動とエアロゾル挙動に注目し，データを取得する。

4.2. 実験データの整理

採取したデータについて，気泡界面の変形などによる界面とエアロゾル粒子との相互作用に関し，気泡放出部から上昇過程，水面での破裂に至るまでの気泡移動に係る流動様式ごとに検討し，エアロゾル除去に重要なパラメータを抽出して実験データを整理する。さらに，整理したパラメータを用いて界面変動等に起因するエアロゾル除去効果について，流動様式に応じたモデル化の方法を検討する。

表 4-1 単一気泡による DF 測定試験基本仕様

項目	内容	備考
装置構成	実験部容器,コンプレッサあるいは窒素ボンベ,ボイラ,エアロゾル供給系,エアロゾル計測系,排水処理系	
計測機器	高速度カメラ,PIV 用粒子,	試験計画および予備試験により検討する.
試験条件	大気圧,常温~100°C	
作動流体	水-空気 (窒素) 水-蒸気 水-蒸気-非凝縮性ガス-難溶解性エアロゾル 上記 3 条件はスケーリング特性の確認のため,水以外の作動流体も考慮可 水-蒸気-非凝縮性ガス-難溶性エアロゾル	
試験パラメータ	ガス噴出し方向: 下,横,上 穴形状: 円 基本,破損口形状 適宜,理想化 口径: 3 種類 クエンチャ,ベント管を模擬し,スケーリングを考慮して寸法決定 ガス流出速度: 0.1~1m/s 弱 非凝縮性ガス濃度: 0~100% エアロゾル組成・粒径・濃度 サブクール度: 液温常温から飽和温度までの範囲高さ方向に大きな温度勾配を設定する実験条件も含む サブマージェンス: 100mm~1000mm	
計測項目	<ul style="list-style-type: none"> • 気泡形状等 (気泡の重心位置,重心軌道及び径,界面形状等)を評価) • 気泡及びエアロゾル粒子の速度分布 • エアロゾル濃度及びその変化 (気泡内外) • 液温及び気相温度 (実験装置内で複数点,大まかな空間分布) 液相内で温度成層を形成させる場合には,高さ方向の液温温度分布 (詳細分布) 	全て時間変化を計測.

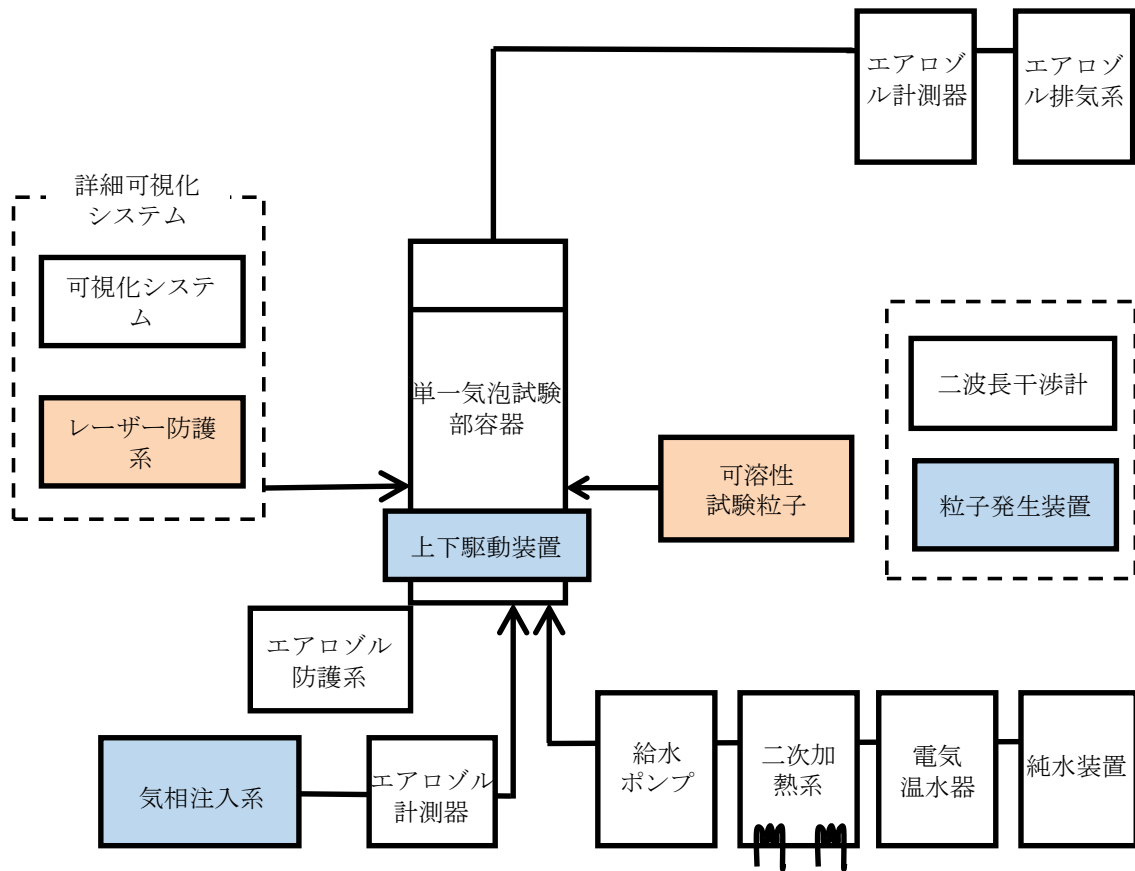


図 4-1 単一気泡実験装置系統図

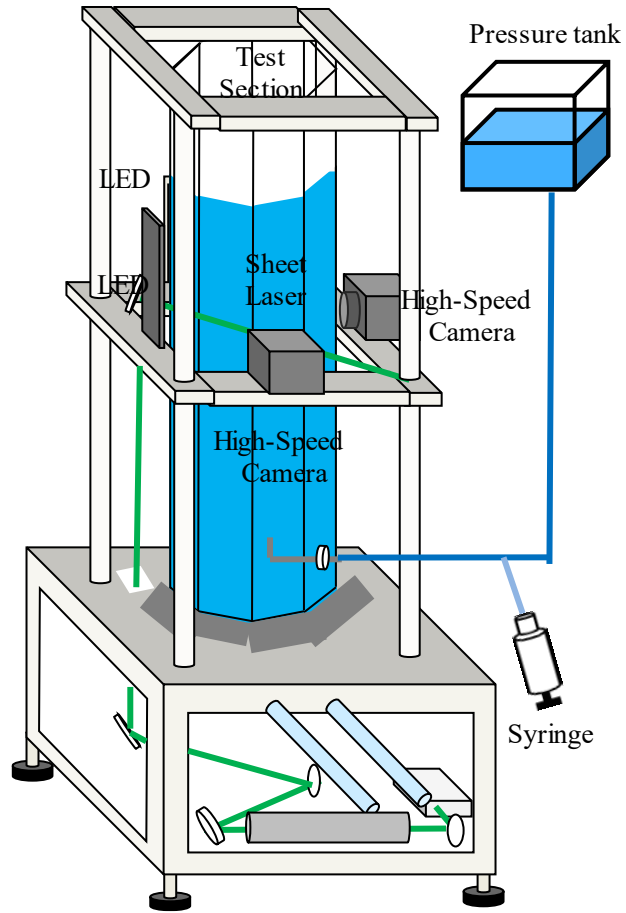


図 4-2 単一気泡による DF 測定試験 試験部

4.3. 本研究で着目するパラメータ

4.3.1. 本研究が対象とする MELCOR におけるプールスクラビングモデルの概要

原子力発電所の過酷事故進展解析コードとして広く用いられる MELCOR コード(Gauntt et al., 2001)^[1]にはプールスクラビングに関する物理モデルが定義されている。

物理モデルは図 4-3 に示されるようにエアロゾル、非凝縮性ガス、凝縮性ガスからなる混合気がベント管出口を通じてプール水中に放出される二相流モデルを考慮する。混合気は流動形態の変化から i) 管から混合気が噴出し、大気泡を生成するグローブユール領域, ii) 気泡が分裂や合体を行わず、定常的に上昇するスウォーム領域, iii) 気泡がプール水の気液界面に到達するエントレインメント領域の 3 つに分けて考えられる。

MELCOR においては各除染因子ごとに除染係数(DF)が定められている。 DF とは各フローパスにおいてエアロゾルの除染量を表す係数であり、以下のように示される:

$$DF = \frac{\text{スクラビング前のエアロゾル総質量濃度}}{\text{スクラビング後のエアロゾル総質量濃度}} \quad (4-1)$$

グローブユール領域においては気泡中における凝縮に起因する DF_{EC} , 気泡内慣性衝突に起因する $DF_{II,i}$, 気泡内粒子の界面に対する慣性衝突に起因する $DF_{RR,i}$ の 3 つが考慮されている。スウォーム上昇領域においては上昇する気泡内における流動に起因する DF が考慮されており, $DF_{SR,i}$ として定義されている。これらプールスクラビングにおける全ての DF 考慮した $DF_{OV,i}$ が考慮されており、以下のように表される:

$$DF_{OV,i} = DF_{EC} \times DF_{II,i} \times DF_{RR,i} \times DF_{SR,i} \quad (4-2)$$

MELCOR モデル SPARC90 (Owczarski et al., 1991)^[2]をもとに作られており、同モデルの特徴であるベント管出口直後におけるグローブユール領域とスウォーム上昇領域が線形的に遷移するモデルが採用されている。MELCOR モデルにおいては全気相体積におけるスウォームに含まれる体積である気相体積割合 f_{gl} ならびに全気相がスウォーム上昇領域にあると仮定した DF である $DF_{BB,i}$ を用いて、 $DF_{SR,i}$ を以下のように表す:

$$DF_{SR,i} = \frac{1}{f_{gl} + \frac{(1-f_{gl})}{DF_{BB,i}}} \quad (4-3)$$

以上で示された全気相がスウォームに含まれると仮定した DF である $DF_{BB,i}$ は、気泡の界面における物質移動係数として界面の法線方向に向かう粒子の速度 $V_{n,i}$ を定義しており、この物質移動係数を界面の法線方向に積分することで単一気泡から除染される微粒子の量を計算する。各気

泡の表面積 A 、気泡の除染時間 Δt 、そして気泡体積 v_b を使用して $DF_{BB,i}$ は以下のように表される:

$$DF_{BB,i} = \exp \left[\frac{\Delta t}{v_b} \int_{A_{surf}} V_{n,i} dA \right] \quad (4-4)$$

スウォーム上昇中の気泡において図 4-4 に示されるような単一気泡中の流動が想定されており、界面に向かう粒子の局所離脱速度の合計値 $V_{n,i}$ は以下の式(5)のように 4 つの駆動力による速度の合計であるとしている:

$$V_{n,i} = V_{c,i} + V_{D,i} - V_{g,i} - V_V \quad (4-5)$$

$V_{c,i}$ は気泡内の旋回運動に伴い、遠心力による局所離脱速度であり、重力沈降による局所離脱速度 V_g 、ならびに界面における局所速度 V_S 、界面における曲率半径 r_c 並びに重力加速度 g を用いて以下のように表される:

$$V_{c,i} = V_{g,i} \left(\frac{V_S^2 / r_c}{g} \right) \quad (4-6)$$

界面における局所速度 V_S は気泡の上昇に伴う界面運動による速度であり、ノンスリップ、ポテンシャル流れの仮定をおいて真球中の流れ関数を解いた Hill's Spherical Vortex (Hill et al., 1894)^[3] を扁球に拡張し (Demitrack et. al., 1983)^[4]、以下のように表される:

$$V_S = - \frac{V_z \left(\frac{r \sin \theta}{a} \right)}{\left[\left(\frac{r \cos \theta}{b} \right)^2 + \sinh^2 \xi_0 \right]^{\frac{1}{2}}} \frac{1}{[\sin \xi_0 - \cosh^2 \xi_0 \cot^{-1} \sinh \xi_0]} \quad (4-7)$$

なお、 $\sinh \xi_0$ 、 $\cosh \xi_0$ 並びに γ は以下のように表される:

$$\begin{aligned} \sinh \xi_0 &= \left[\left(\frac{a}{b} \right)^2 - 1 \right]^{-1/2} \\ \cosh \xi_0 &= \left[1 - \left(\frac{b}{a} \right)^2 \right]^{-1/2} \\ \gamma &= \left[\left(\sin \frac{\theta}{a} \right)^2 + \left(\cos \frac{\theta}{b} \right)^2 \right]^{-1} \end{aligned} \quad (4-8)$$

エアロゾルの重力沈降による局所離脱速度: $V_{g,i}$ は、70 μm 以下の微粒子が沈降する際の終端速

度を表すストークスの式より，微粒子径 d_i ，気相密度 ρ_g ，液相の粘性係数 μ ，カニングガムの補正係数 S_i ，地心緯度 β として以下のように表される：

$$V_{g,i} = \frac{\rho_g g S_i d_i^2}{18\mu} \cos \beta \quad (4-9)$$

V_D はブラウン運動に伴う粒子の拡散による局所離脱速度であり，上昇気泡中の界面更新に伴う物質移動を示した Higbie penetration theory (Bird et al., 1960)^[5] を用いて以下のように表される：

$$V_{D,i} = \left(\frac{D_i}{\pi \tau_e} \right)^{1/2} \quad (4-10)$$

なお，上式において τ_e は界面における気液界面の接触時間， D_i は粒子の拡散係数を表す．ブラウン拡散における拡散係数はボルツマン定数 k_B ，ガス温度 T ，カニングハムスリップ補正係数 S_i ，流体の粘性係数 μ からストークス-アインシュタインの関係式を用いて以下のように表される：

$$D_i = \frac{k_B T S_i}{3\pi\mu d_i} \quad (4-11)$$

気泡の界面において蒸発が生じるケースの場合，蒸気の蒸発に伴う物質輸送に伴うステファン流による物質移動係数 V_V も微粒子の除染に大きく影響する可能性がある．そこで，MELCOR においては気泡の内部における蒸気の質量 m_s と，気泡の界面を A として，以下のように表される (A. T. Wassel et al., 1985)^[7]：

$$V_V = \frac{dm_s/dt}{\rho_g A} \quad (4-12)$$

4.3.2. 着目パラメータとそれらを計測するための実験計画

4.3.1 項に記載したように，本実験では，分裂した気泡群が上昇するスウォーム上昇領域におけるスクラビング現象を対象としており，この領域におけるパラメータのうち，計測可能でかつ重要と考えられるのがエアロゾルを含んだ状態における気泡形状，気泡上昇速度，気泡内部のエアロゾル挙動，界面速度，局所遠心力速度及び遠心力による物質移動係数である．そこで，以下の表 4-2 に示す実験を計画した．

表 4-2 本研究で着目するパラメータ

着目パラメータ	使用実験装置	実験
気泡形状	単一気泡可視化実験装置	単一気泡上昇挙動可視化実験
気泡上昇速度		
気泡内部のエアロゾル挙動	油滴内部流動可視化実験装置	油滴を用いた内部流動可視化実験
界面速度及び局所遠心力速度		
遠心力による物質移動係数	単一気泡可視化実験装置、 干渉計実験装置	微粒子除染現象可視化実験

また、本実験は各パラメータの基本的な特性を計測評価することを目的とし、第1ステップとして、全て、大気圧、常温、水-空気系の条件で、ガスの噴出し方向を上方、穴形状を円、着目する現象に合わせたノズル径を基本として実施した。

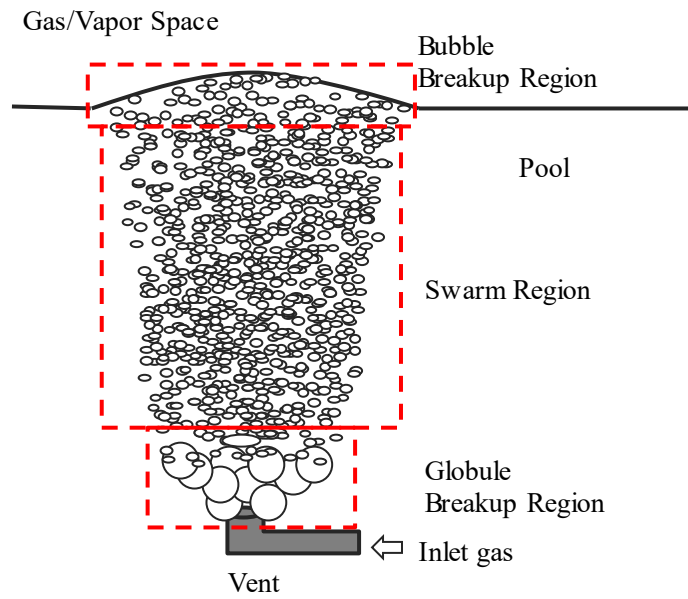


図 4-3 MELCOR モデルにおいて想定される二相流挙動

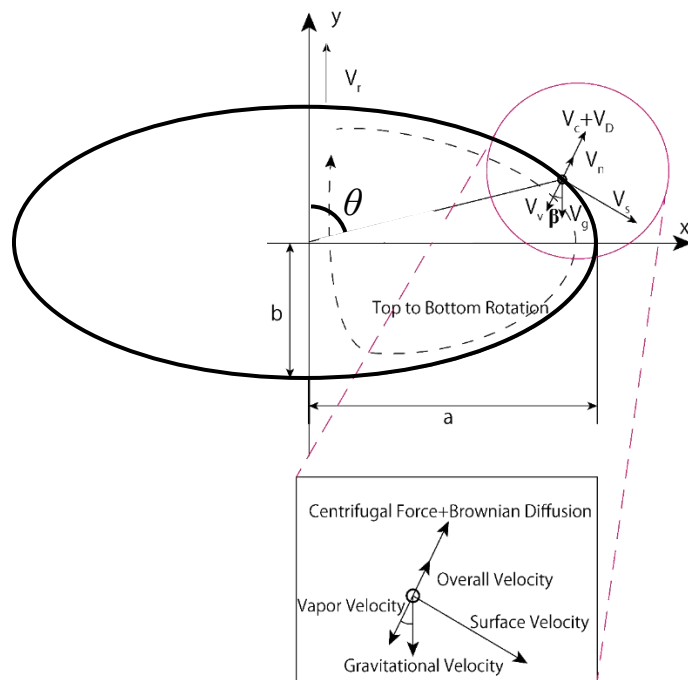


図 4-4 MELCOR モデルにおいて想定される単一気泡中流動

4.4. 実験装置および実験手法

4.4.1. 単一気泡可視化実験装置の概要

図 4-5 に油滴内部流動可視化実験に用いた実験装置の概要を示す。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 LED 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、水頭はノズルの位置を原点として 1000 mm の位置に設定した。また、可視化実験はノズルの位置を原点として 4 つの高さ ($z=0, 200, 400, 600\text{ mm}$) において行った。全ての実験は常温 (20 °C)、常圧の条件において行った。

微粒子が気泡の挙動に与える影響を調べるために微粒子を気泡の内部に混入した条件において気泡挙動の可視化実験を行った。本計測において使用する試験流体および粒子の物性を表 4-3 に示す。本実験においては粒子をシリンジの内部で空気とともに攪拌を行った後に、水槽内部に単一油滴として手動で注入する。上昇する気泡の両面から LED バックライトをそれぞれ照射し、気泡の界面を二方向から同時に計測した。

今年度は気相注入部分のシリンジポンプ機構の導入、光学系の上下動機構に使用する駆動部品の更新、気相中への粒子の混入に用いた二流体ノズル、湿式エアロゾル発生装置およびスモーク発生装置の追加に関する改造を行った。

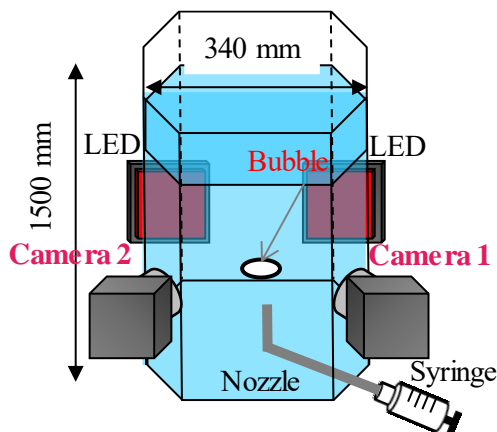


図 4-5 気泡形状可視化実験装置

表 4-3 気泡可視化実験で使用した流体の物性

	Density [kg/m ³]	Viscosity [m ² /s]	Surface tension [N/m]	Refractive index [-]
Water	997	0.90	-	1.333
Air	1	15.58	73 ^{*1}	1.000

*1 value against air

4.4.2. 単一気泡実験装置におけるエアロゾル微粒子および発生手法の検討

本計測において使用した粒子の物性を表 4-4 に示す。本計測で使用した微粒子は親水性フェュームドシリカ (OX50) (AEROSIL OX50, 日本アエロジル株式会社製), 硫酸バリウム (BaSO₄) (022-00425, 富士フィルム和光純薬株式会社製), ヨウ化セシウム (CsI) (035-12442, 富士フィルム和光純薬株式会社製), グリセリン水溶液の四種類であり, 加えて粒子のない No particle 条件においても実験を行った。微粒子の物性として特に着目したのは粒子の水溶性であり, OX50 および BaSO₄ 条件は不溶性, CsI およびグリセリン水溶液条件は可溶性粒子を使用した。

前年度までの微粒子の発生手法は, シリンジを用いてエアロゾルを攪拌する乾式を用いていたが, 濃度のコントロールが非常に難しかったため, 特にエアロゾル濃度が希薄な条件における実験が困難であった。そこで, 本年度の実験においてはエアロゾルを液体として発生する湿式のエアロゾル発生手法を検討した。本年度はエアロゾルのソースとなる液体を加熱し, 再び凝縮することでスモークを発生するスモーク発生装置 (PORTA SMOKE PS2006, ダイニチ工業株式会社製), および二流体ノズルから出た粒子を 90 度方向に反射するエアロゾル発生器 (ATM-226, TOPAS 社製) を使用した。各粒径により発生したエアロゾルをエアロゾル計測器により計測した粒径分布および濃度を示す。以上のように, 10⁴ p/cc オーダーで安定して粒子を発生できた。

表 4-4 気泡の内部に混入した微粒子の物性

	Diameter [m]	Density [kg/m ³]	Solubility to water
	×10 ⁻⁶	×10 ³	×1
Fumed silica (SiO ₂)	0.04	1.8	Insoluble
Barium sulfate (BaSO ₄)	0.64	4.5	Insoluble
Caesium iodide (CsI)	1.0 – 1.2	4.5	Soluble
Glycerin Solution	0.2	1.1	Soluble

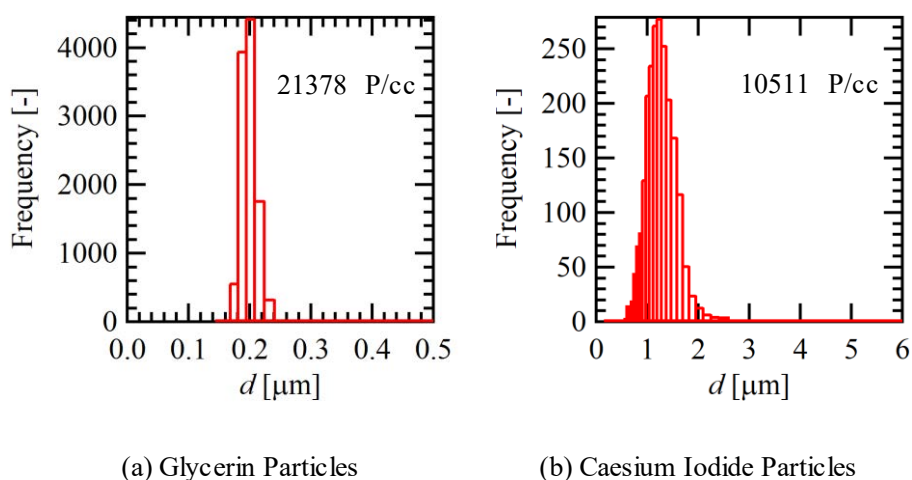


図 4-6 湿式エアロゾル発生装置により生成したエアロゾルの粒径

4.4.3. 油滴内部流動可視化実験の概要

図 4-7 に油滴内部流動可視化実験に用いた実験装置の概要を示す。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 (AX200, Photron 社製), 50 mm レンズ (AI Nikkor 50mm f/1.2S, Nikon 製), シート厚 1 mm の 5W ファイバーシートレーザー (DPGL-5W, 日本レーザー社製), バックライト LED からなる光学系で構成されている。水槽の下部には交換可能な内径 $d = 3, 6, 10$ mm の L 字ノズルが設置されており, 水頭はノズルの位置を原点として 1000 mm の位置に設定した。また, 可視化実験はノズルの位置を原点として 4 つの高さ ($z = 0, 200, 400, 600$ mm) において行った。全ての実験は常温 (20 °C), 常圧の条件において行った。

本計測においては, MELCOR モデルにおいて定義されている内部流動現象を直接可視化する。しかしながら, 実機において想定される気泡の内部流動を直接可視化することは気-液界面の屈折率差により困難であるため, 本実験においては気泡の条件とともに, 水と屈折率の近い油滴を用いて気泡を模擬した液-液系においても実験を行う。本計測において使用する試験流体, の物性をそれぞれ表 4-5 に示す。気泡の実験においては内部に投入する微粒子としてエクспанセル粒子 (Expancel, 日本ファイライト社製) を用いた。また, 油滴の実験においては油滴としてシリコンオイル (KF-96L-0.65CS, 信越化学社製), 油滴内部に投入する可視化粒子としては蛍光粒子 (FLUOSTAR, EBM 製) を使用した。シリコンオイルとレーザー粒子は攪拌を行った後に, シリンジを用いて水槽内部に単一の油滴として注入する。上昇する油滴に垂直な断面においてレーザーシートを, 背面から LED バックライトをそれぞれ照射し, 内部の微粒子および界面の同時計測を行った。

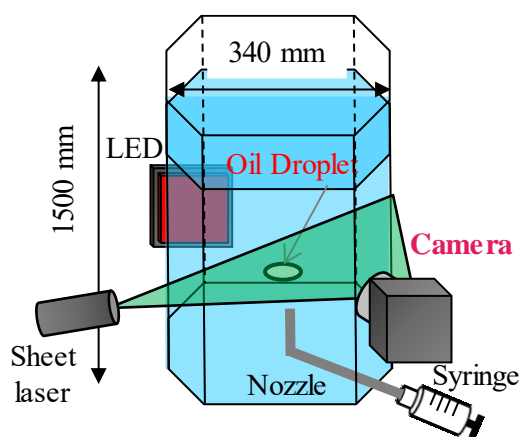


図 4-7 油滴内部流動可視化実験装置

表 4-5 油滴内部流動の可視化実験に用いた流体の物性

	Density [kg/m ³]	Viscosity [m ² /s]	Surface tension [N/m]	Refractive index [-]
KF-96L-0.65cs (Silicone Oil)	×1 758	×10 ⁻⁶ 0.65	×10 ⁻³ 39*1	×1 1.375

4.4.4. 干渉計実験装置の概要

図 4-8 に気泡除染現象可視化の実験を行うために本研究で使用した二波長干渉計の光路図を示す。本研究で使用する干渉計はレーザービームをプリズムで物体光と参照光に分けた後に、再び集光することで両光路の光路長差から干渉縞計測を行う M/Z 干渉計と同様の光学系を使用している。干渉計の光学系に用いた光源は干渉計用のグリーンレーザー、レッドレーザー、顕微鏡撮影用の白色 LED バックライトをカットフィルタで 540 nm ショートパスフィルタから 650 nm ショートパスフィルタでカットした帯域を使用しており、本計測では主にグリーンレーザーと LED バックライトを用いる。本計測においてはビーム光束の幅がプリズムのサイズに依存しており、本計測では幅 15 mm × 高さ 15 mm のプリズムを使用しているためにビームの直径は 14 mm に設定している。干渉計の中心には可視化セクションが設けられており、本計測においては可視化セクション内に水槽を挿入することで気泡の計測を行う。テストセクションの背後ではダイクロイックプリズムによりグリーンレーザーと LED バックライトの光がそれぞれ分光されており、二台のハイスピードカメラ (UX100 または AX200, Photron 社製) を用いて計測を行う。

本計測で使用したテストセクションの概要を図 4-9 に示す。テストセクションは矩形の透明なアクリルガラスからなる可視化水槽 (125×200×160 mm) で構成されている。ビームの通過する部分のみ部材平行度の確保と偏光を防止するために石英ガラスを使用している。物体光のビームの下、水槽の中心位置に内径 $d=3$ mm の丸ノズルが設置されており、水頭はノズルの位置を原点として 100mm の位置に設定した。また、可視化実験はノズルの位置を原点として高さ 80 mm の位置において行った。全ての実験は常温 (20 °C)、常圧の条件において行った。

本年度は、二波長干渉計の LED およびレーザーを分光するダイクロイックプリズム部分を改造し、4.7.6 項において後述する速度場および濃度場の同時計測を行う機能を付加した。

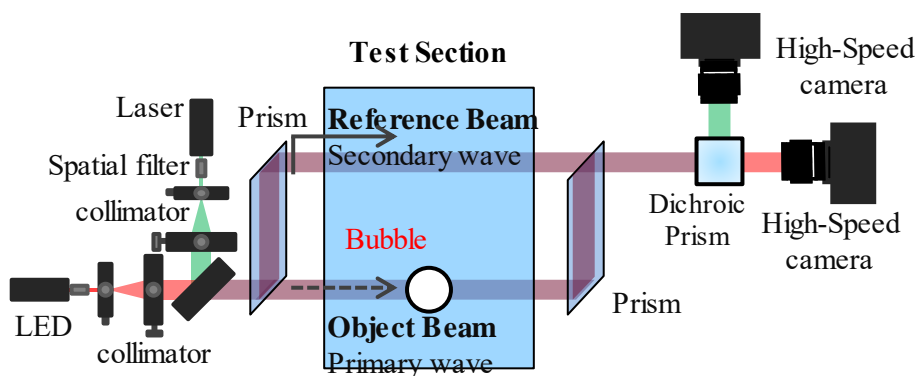


図 4-8 本研究において開発した二波長干渉計の光路図

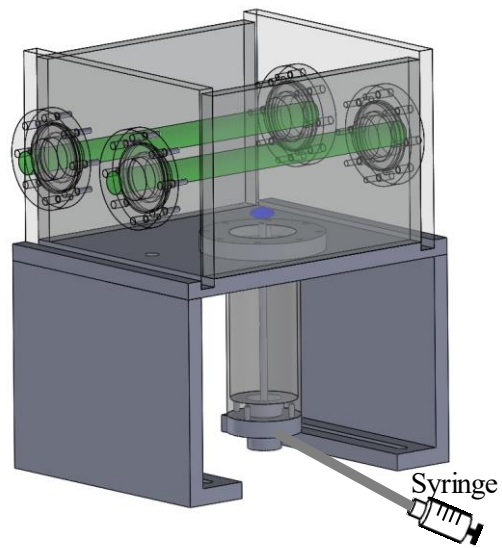


図 4-9 除染現象可視化実験において使用したテストセクションの模式図

干渉縞の計測を行う上で物質を透過する光を計測する必要があるため、不溶性の微粒子で計測を行うことはできない。そこで、本計測においては気泡の内部に投入する微粒子として表 4-4 に示す粒子のうち、湿式エアロゾル発生器を用いて発生したグリセリン水溶液および CsI を用いた。発生した噴霧したミストをシリンジで吸いとり、テストセクションの下部にあるノズルから射出することで干渉縞の計測を行った。

4.5. 単一気泡上昇挙動可視化実験

4.5.1. エアロゾルを含む単一気泡の可視化実験

気泡内に投入する微粒子が気泡の形状や上昇速度に与える影響を調べるために複数のエアロゾル条件 (No particle, OX50, BaSO₄, CsI) において気泡を可視化計測する実験を行った. 図 4-10, 図 4-11, 図 4-12, 図 4-13, 図 4-14, 図 4-15, 図 4-16, 図 4-17 は実験装置の各撮影位置 (ノズルを原点として $z=0, 200, 400, 600$ mm) において気泡の形状を可視化した画像である. 撮影条件はそれぞれシャッター速度 25 ms, フレームレート 4000fps, 解像度が 1280×1024 である. 可視化結果からは全ての撮影高さにおいて湿式の CsI 条件の気泡がその他の条件に比べて明らかに気泡形成直後の初期発振が小さく, 形状変化の収束が早いことが分かる. また, グリセリン水溶液を噴霧した条件においては気泡の内部が曇る傾向がみられた. これは, グリセリン水溶液は噴霧された際に液滴が白色でみられるため, 気泡を透過する光を遮ったからだと考えられる. 一方で, 他の条件においては各撮影条件において有意な差は見られなかった.

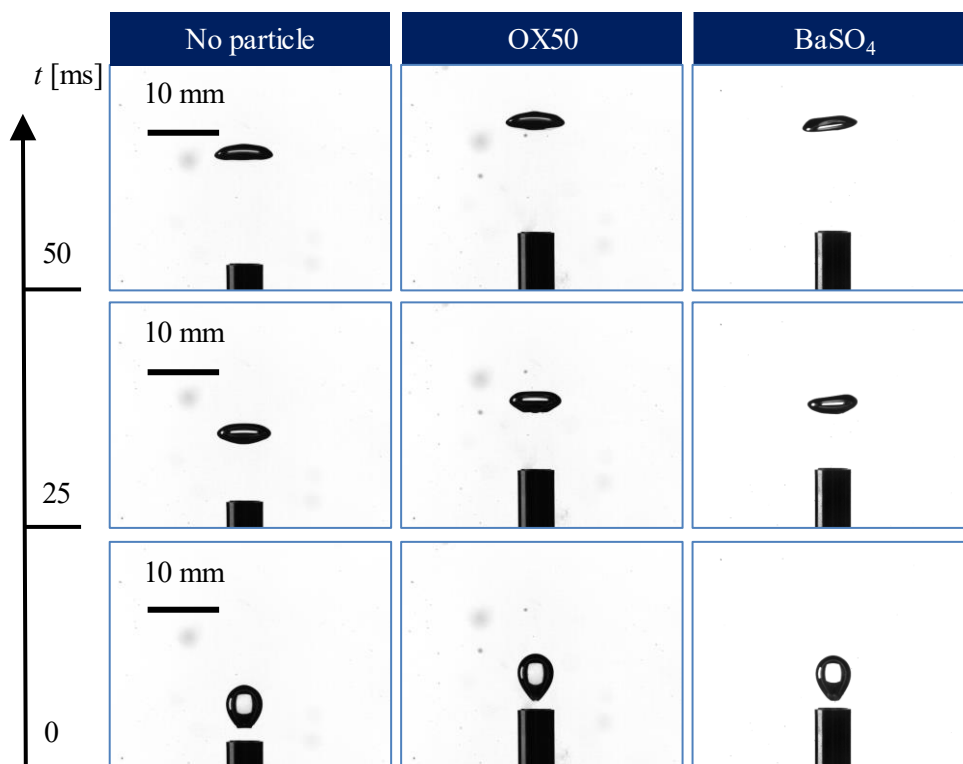


図 4-10 不溶性微粒子条件における気泡挙動の可視化結果 ($d=3$ mm, $z=0$ mm)

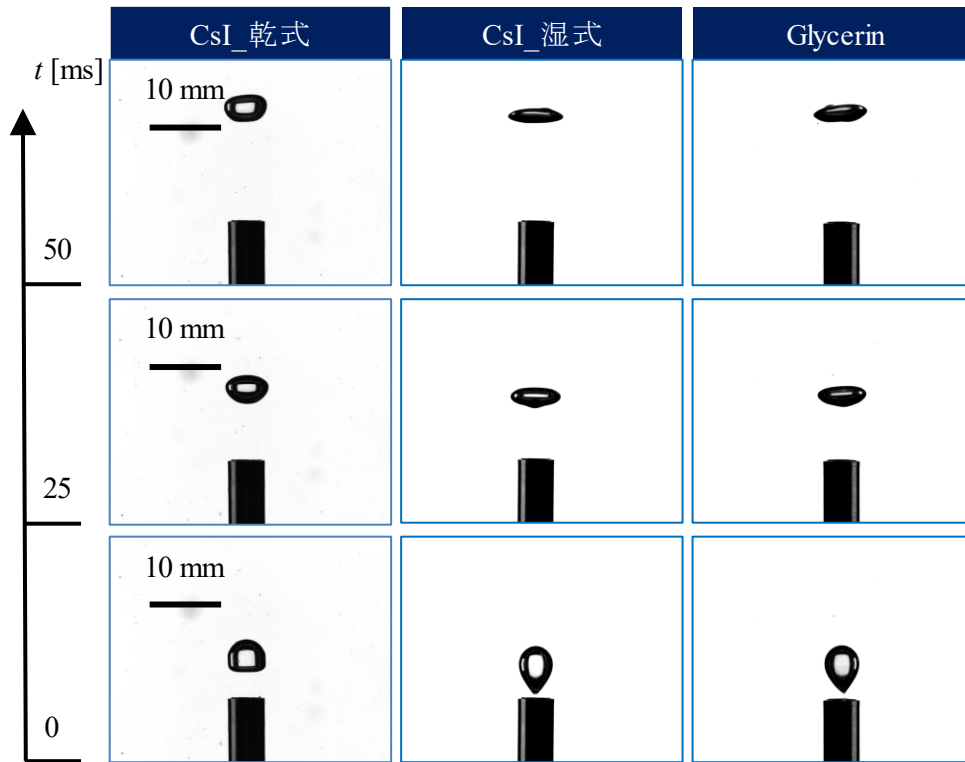


図 4-11 可溶性微粒子条件における気泡挙動の可視化結果 ($d = 3 \text{ mm}, z = 0 \text{ mm}$)

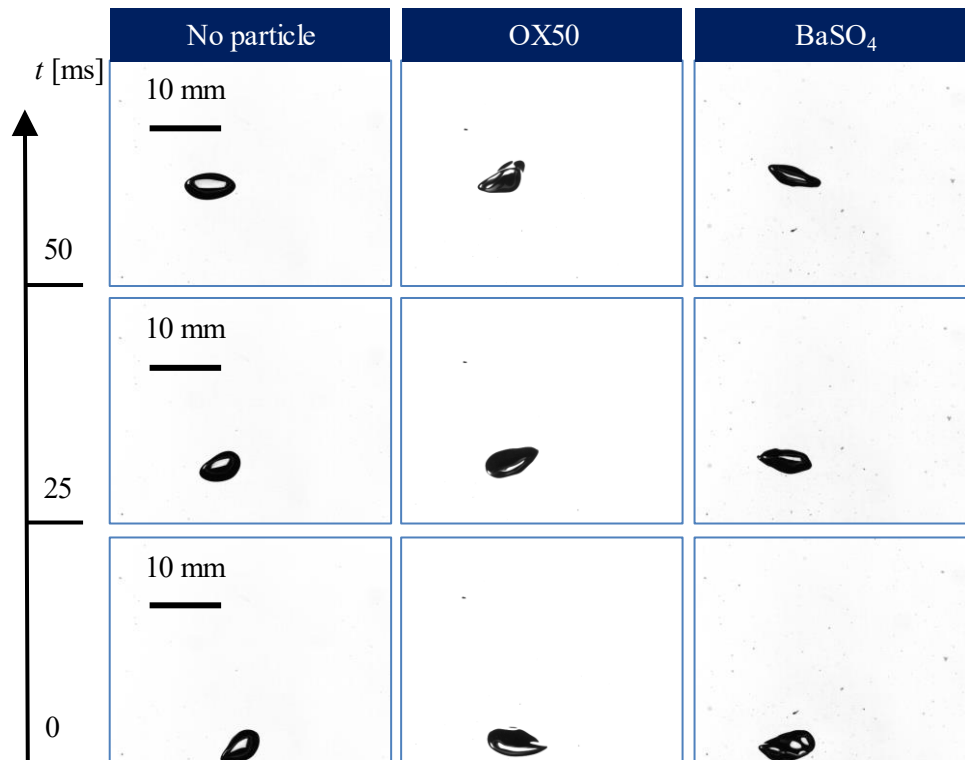


図 4-12 不溶性微粒子条件における気泡挙動の可視化結果 ($d = 3 \text{ mm}, z = 200 \text{ mm}$)

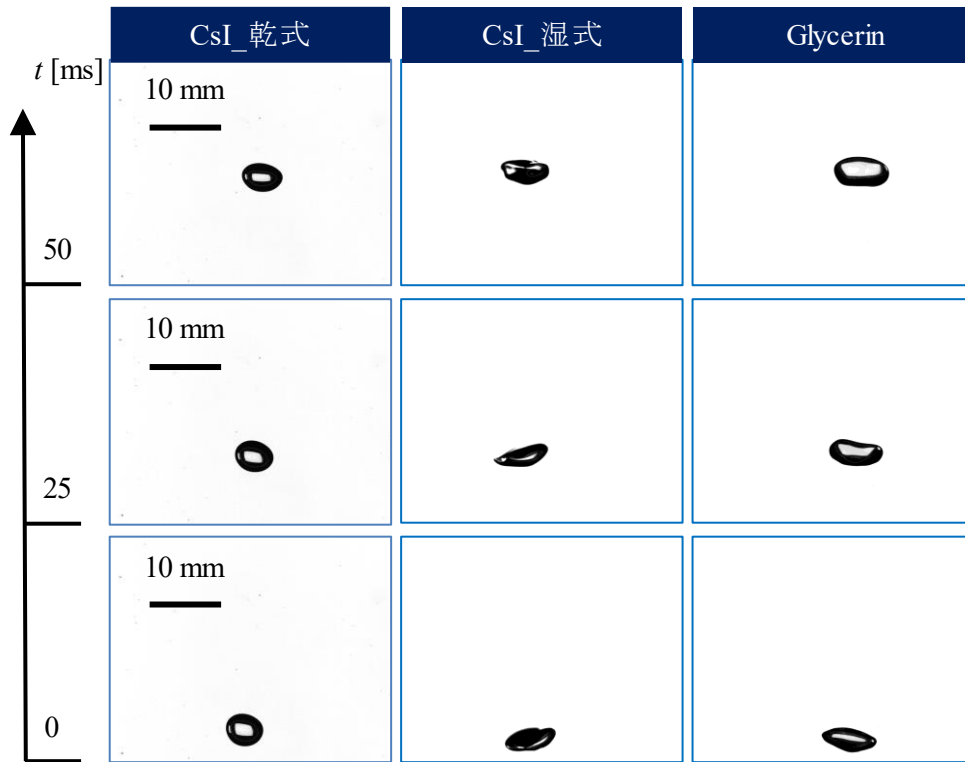


図 4-13 可溶性微粒子条件における気泡挙動の可視化結果 ($d = 3 \text{ mm}, z = 200 \text{ mm}$)

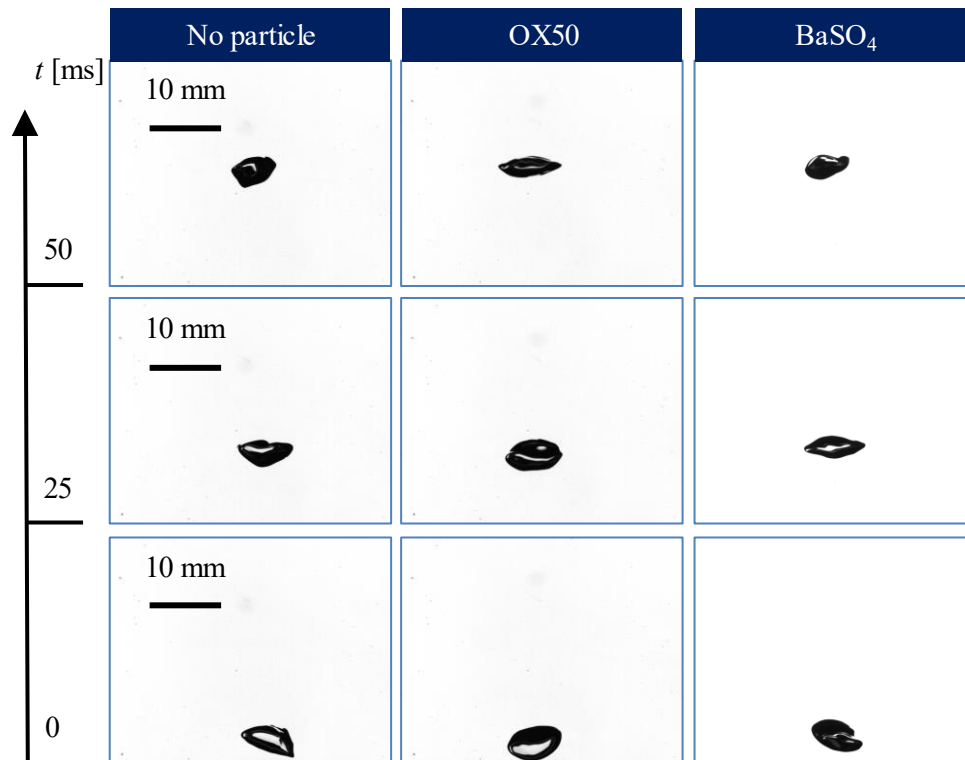


図 4-14 不溶性微粒子条件における気泡挙動の可視化結果 ($d = 3 \text{ mm}, z = 400 \text{ mm}$)

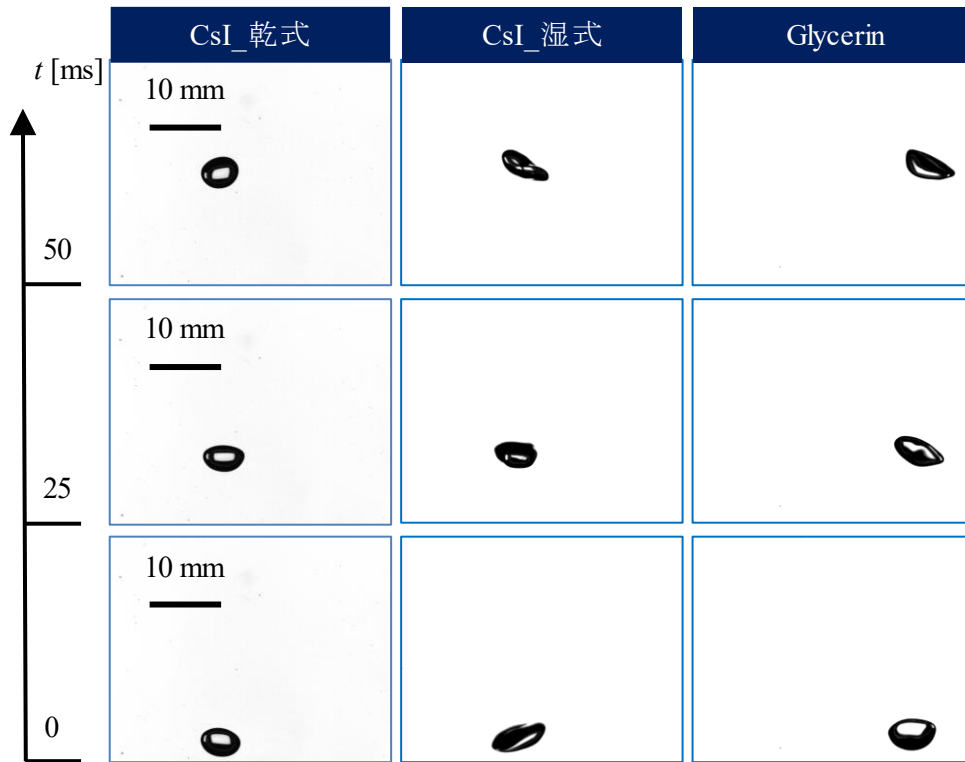


図 4-15 可溶性微粒子条件における気泡挙動の可視化結果 ($d = 3 \text{ mm}, z = 400 \text{ mm}$)

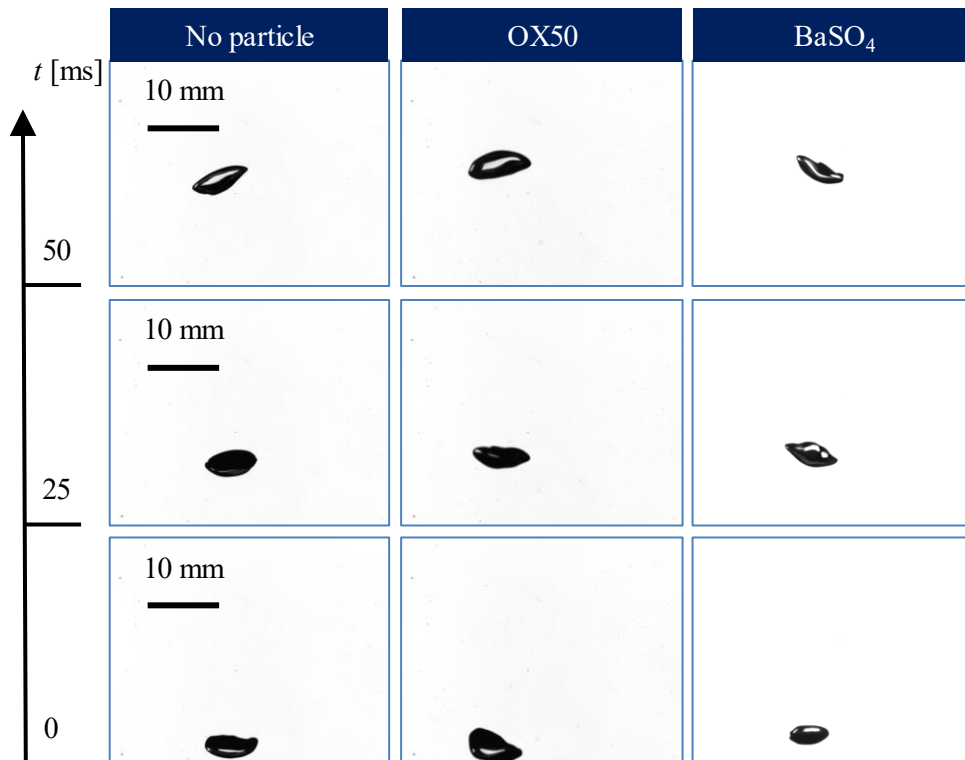


図 4-16 不溶性微粒子条件における気泡挙動の可視化結果 ($d = 3 \text{ mm}, z = 600 \text{ mm}$)

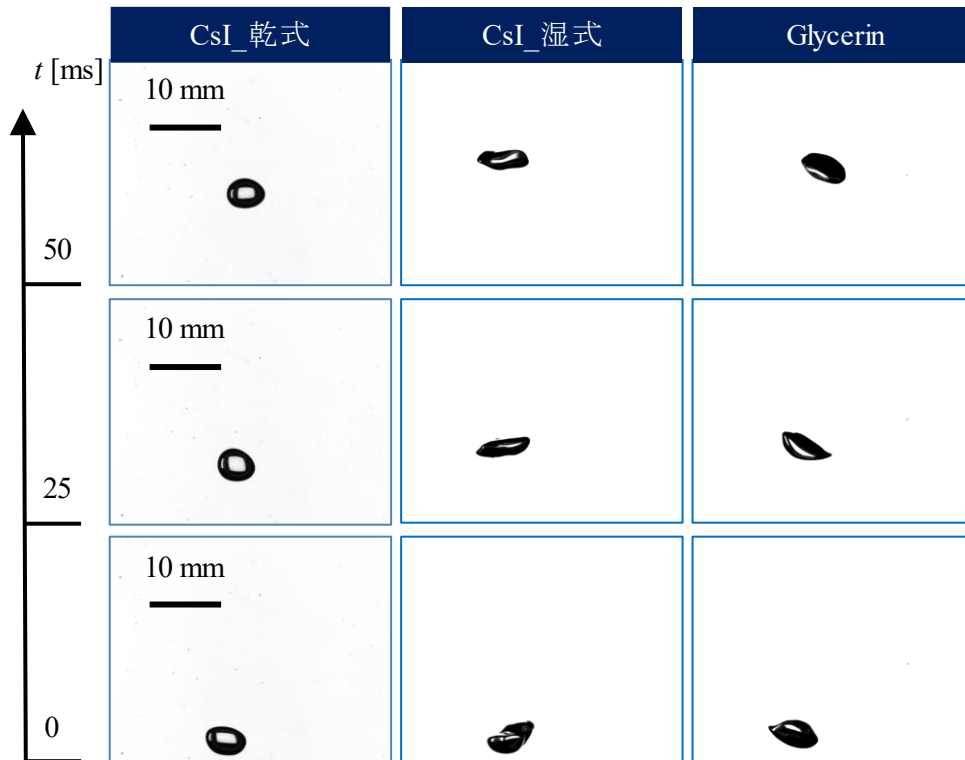


図 4-17 可溶性微粒子条件における気泡挙動の可視化結果 ($d = 3 \text{ mm}, z = 600 \text{ mm}$)

4.5.2. エアロゾルを含む単一気泡の上昇速度

可視化情報から得られた画像の定量評価を行うために気泡上昇速度の計測を行った。各エアロゾル条件 (No particle OX50, BaSO₄, CsI(乾式), CsI(湿式), グリセリン) が気泡の上昇速度に与える影響を計測した。気泡の上昇速度は各画像における気泡の位置座標 (x, z) 座標を画像処理から得ることで速度の瞬時値 $V_{z,e}$ を取得した。計測は N_e 個の瞬時データを M 回ずつ計測したものをを用いて行い、以下の式を用いて平均をとった:

$$\bar{V}_z = \frac{1}{M} \sum_{e=1}^M \frac{\sum_{n=0}^{N_e} V_{z,n,e}}{N_e}. \quad (4-13)$$

なお、式中の n は各瞬時ステップ値、 e は計測回数を示す。本実験において N_e は約 500-600 ステップ、 M は三回とした。また、エラーバーは計測回ごとの標準偏差とした。

図 4-18 に示すのは各計測位置 ($z = 0, 200, 400, 600 \text{ mm}$) において、計測した気泡上昇速度の計測結果である。グラフの縦軸は気泡の上昇速度 V_z 、横軸は計測位置の座標を示す。昨年度の実験結果からは気泡上昇速度は不溶性粒子の条件である OX50 や BaSO₄ 条件において最大値を取り、続いて no particle 条件、可溶性粒子である CsI 条件においては最も低い値を取ることがわかった。しかし、本年度新たに実験したグリセリン水溶液を用いた条件は湿式の CsI と同様の傾向が得られたものの、湿式の CsI 条件においては可溶性粒子を用いたにもかかわらず、乾式の CsI よりも不溶性粒子などと同様の傾向をとった。

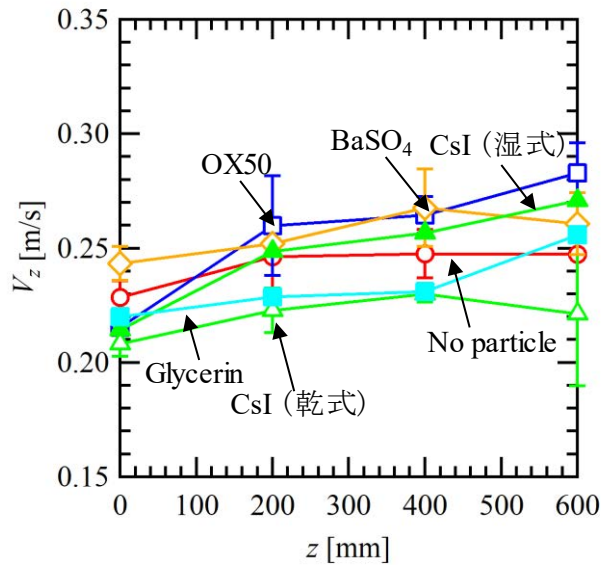


図 4-18 各粒子条件 (No particle, OX50, BaSO₄, CsI)における気泡上昇速度の比較

4.5.3. 既存のモデルと上昇速度の計測結果の比較

続いて、得られた気泡の上昇速度に対して、MELCOR が想定する上昇速度であるに示す Zuber らの相関式 (1965)^[8]:

$$\begin{aligned} V_r(d_{vm} \leq 0.5 \text{ cm}) &= 7.876(\gamma/\rho_l)^{1/4} \text{ [cm/s]} \\ V_r(d_{vm} > 0.5 \text{ cm}) &= 1.40713V_r(d_{vm} \leq 0.5 \text{ cm})d_{vm}^{0.49275}, \end{aligned} \quad (4-14)$$

と実験結果の比較を行った。気泡の上昇速度は各瞬時データにおける差分値から割合の平均値を以下の式から計測した:

$$dV_{z_{MELCOR}} \text{ [%]} = \frac{1}{M} \sum_{e=1}^M \frac{\sum_{n=0}^{N_e} \left[\left\{ 1 - V_{z_{n,e}} / (V_r / 100) \right\} \times 100 \right]}{N_e}. \quad (4-15)$$

図 4-19 に示すグラフは縦軸に上式に示す上昇速度の実験値と MELCOR との誤差をパーセンテージで示したものであり、横軸には各計測位置 ($z = 0, 200, 400, 600 \text{ mm}$)を示す。

計測結果からは MELCOR と最も近い値を取るのは No particle 条件であり、OX50 や BaSO₄ など不溶性粒子の条件と、湿式の CsI 条件においては MELCOR の値が実験値を過小評価し、乾式の CsI 条件およびグリセリン水溶液の条件においては MELCOR が過大評価する傾向がある。

ノズル直上の条件である $z = 0 \text{ mm}$ においてはほぼすべての条件において気泡上昇速度の実験値を MELCOR が過大評価する傾向にあった。これは、ノズル離脱直後の気泡は Zuber らが計測を行った気泡の終端速度に至っていないからである。また、湿式の CsI とグリセリン水溶液において結果が異なった理由としては図 4-6 に示すように、乾式 CsI の方がエアロゾルの個数濃度が

二倍低いこと、また、CsI は水と質量比 5:1 で希釈していることにより、個数濃度比以上に気泡の界面に与える影響が小さくなったからであると考えられる。

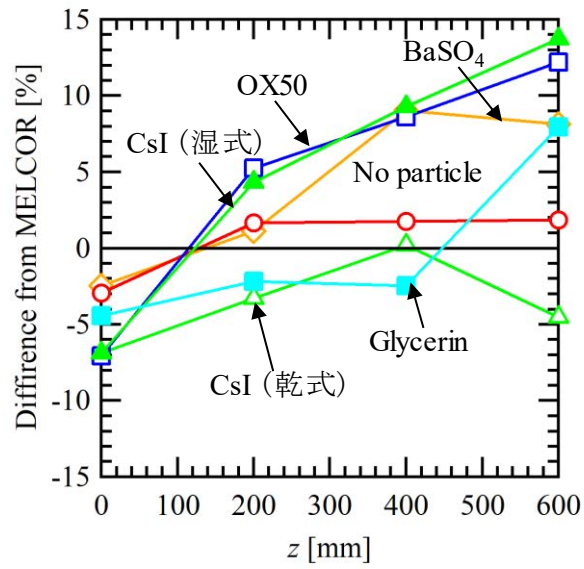


図 4-19 各粒子条件 (No particle, OX50, BaSO₄, CsI)における気泡上昇得度と MELCOR における気泡上昇速度の比較

4.5.4. エアロゾルを含む単一気泡の形状

可視化情報から得られた画像の定量評価を行うために画像処理のデータを基に気泡形状の計測を行った。各エアロゾル条件 (No particle OX50, BaSO₄, CsI(乾式),CsI(湿式),グリセリン)が気泡のアスペクト比に与える影響を計測した。気泡のアスペクト比は各画像における気泡の位置座標 (x, z)座標を画像処理から得ることで速度の瞬時値 $E_{n,e}$ を取得した。計測は N_e 個の瞬時データを M 回ずつ計測したものをを用いて行い、以下の式を用いて平均をとった:

$$\bar{E} = \frac{1}{M} \sum_{e=1}^M \frac{\sum_{n=0}^{N_e} E_{n,e}}{N_e}. \quad (4-16)$$

また、エラーバーは計測回ごとの標準偏差とした。

図 4-20 に示すのは各計測位置 ($z = 0, 200, 400, 600$ mm) において、計測した気泡アスペクト比の計測結果である。グラフの縦軸は気泡のアスペクト比 $E_{n,e}$ 、横軸は計測位置の座標を示す。昨年度の実験結果からはアスペクト比は不溶性粒子の条件である OX50 や BaSO₄ 条件および No particle 条件においては一貫して近い値をとるのに対して、可溶性粒子である CsI 条件においては、その他の値を大幅に下回り、可溶性粒子が界面活性剤のような効果を示すことが示された。しかしながら、本年度新たに実験した湿式の CsI 粒子およびグリセリン水溶液を用いた条件では可視化画像と同様に、アスペクト比の大幅な変化は確認できなかった。

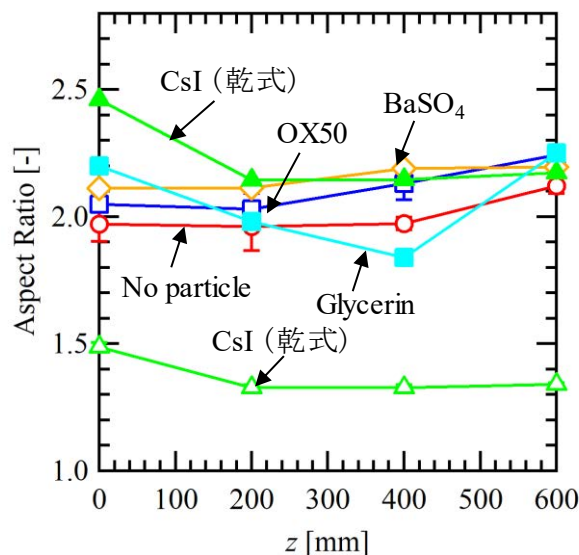


図 4-20 各粒子条件 (No particle, OX50, BaSO₄, CsI)における気泡アスペクト比の比較

4.5.5. 既存のモデルとアスペクト比の計測結果の比較

続いて、得られた気泡の上昇速度に対して、MELCOR が想定する気泡のアスペクト比である式(1-11)に示す Paul ら⁹⁾の実験式と実験結果の比較を行った。気泡のアスペクト比は各瞬時デー

タにおける差分値から割合の平均値を以下の式から計測した:

$$dE_{MELCOR} [\%] = \frac{1}{M} \sum_{e=1}^M \frac{\sum_{n=0}^{N_e} \{(1 - E_{n,e}/E_{MELCOR}) \times 100\}}{N_e} \quad (4-17)$$

図 4-21 に示すグラフは縦軸に上式に示すアスペクト比の実験値と MELCOR との誤差をパーセンテージで示したものであり、横軸には各計測位置 ($z = 0, 200, 400, 600$ mm)を示す。

計測結果からは MELCOR と最も近い値を取るのは CsI 条件であり、OX50 や BaSO₄ など不溶性粒子の条件および No particle においては MELCOR の値が実験値を過小評価する傾向がある。

Paul らの相関式が粒子を混入しない気泡の条件における実験結果を用いているにもかかわらず、No particle の条件と一致しないのは Paul ら (1985)の相関式は気泡の初期変形が小さい条件において実験を行っている一方で、本実験は初期変形が大きい条件で実験を行っているからである。アスペクト比が CsI 条件と良い一致を示す理由としては、界面活性剤を混入した気泡は初期変形が小さい気泡と形状がよく一致するとの報告が富山ら (2002)^[10]によってなされており、このことは可溶性粒子が気泡の界面に対して界面活性剤のように作用することの補強となる。一方で、実際の二相流条件においては、単一気泡の様々射出条件における気泡の最大アスペクト比を示す大川ら (2003)^[11]の式と、気泡の最小アスペクト比を示す Wellek ら (1966)^[12]の式の間広く分散していることが阿部ら (2018)^[13]の実験において報告されており、MELCOR の実験式よりも本実験の条件のほうが実現現象の条件に近いと考えられる。

一方で、湿式の CsI やグリセリン水溶液においては MELCOR の値に対して MELCOR との差が過渡的に変化する傾向がみられた。これは、気泡内の微粒子の除染に伴い、気泡界面に滞積する微粒子の濃度が増加することで微粒子が気泡に与える影響が過渡的に変化するからであると考えられる。

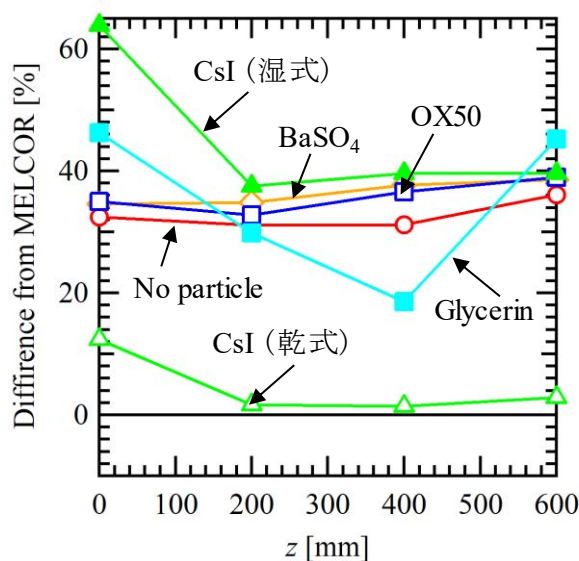


図 4-21 各粒子条件 (No particle, OX50, BaSO₄, CsI)における気泡アスペクト比と MELCOR における気泡アスペクト比の比較

4.6. 油滴を用いた内部流動可視化実験

4.6.1. 油滴の可視化計測

MELCOR においては 4.3.1 項に示すような気泡の内部における微粒子運動が定義されている。しかしながら、本流動を実際に計測した研究は存在せず、微粒子の運動を直接計測することが求められている。しかしながら、気泡の内部は気液界面における屈折率の影響から気泡の内部を直接計測することはできない。そこで、分散相側の模擬流体としてシリコンオイルを投入し、油滴を気泡に模擬することで内部流動の計測を行った。油滴の内部には蛍光粒子である FLUOSTAR を投入し、シートレーザーで断面を切ることで内部流動の可視化を行った。図 4-22 に管内径 $d=10\text{ mm}$ の条件でノズル離脱後に定常上昇する条件（ノズルを原点として $z=200\text{ mm}$ ）における油滴内部流動の可視化結果を示す。撮影条件はシャッター速度 0.2 ms 、フレームレート 5000 fps 、解像度が 768×768 である。本条件においては等価直径が 10.7 mm 程度の油滴が得られた。内部流動の可視化結果からは油滴の界面に至るまで鮮明な可視化画像を得られた。

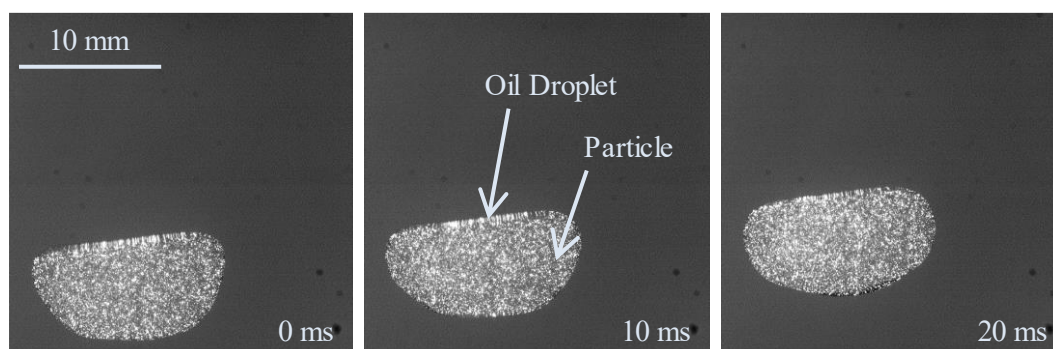


図 4-22 FLUOSTAR を投入した条件における油滴内部流動の可視化結果 ($d=10\text{ mm}$)

4.6.2. 局所二次元速度場の計測

以上の結果をふまえ、画像処理を用いて油滴の重心座標一定の座標変換、及び背景差分処理を行った結果を図 4-23 に示す。座標変換の結果からは可視化画像を油滴の重心一定座標に変換できることが示された。画像処理後の画像を用い、PIVを行った結果を図 4-24 に示す。油滴内部における微粒子速度場の計測結果から内部流動の流動構造が得られた。油滴の内部においては、油滴の界面付近においては界面の運動に伴う下降流が、油滴の中心部分においては上昇流が確認された。また、油滴の下部においては、上部に比べて流速が著しく小さいことがわかった。上記の結果は、式(4-7)に示すように気泡の内部流動を理想的な扁球に対してスリップなし、等ポテンシャル流れと仮定した MELCOR における想定と異なる結果が得られた。

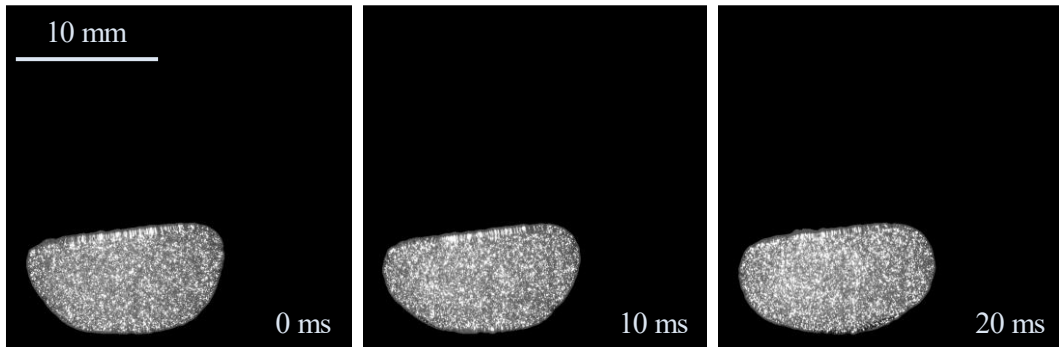


図 4-23 油滴内部流動の画像処理結果（背景除去，および重心座標一定座標変換）

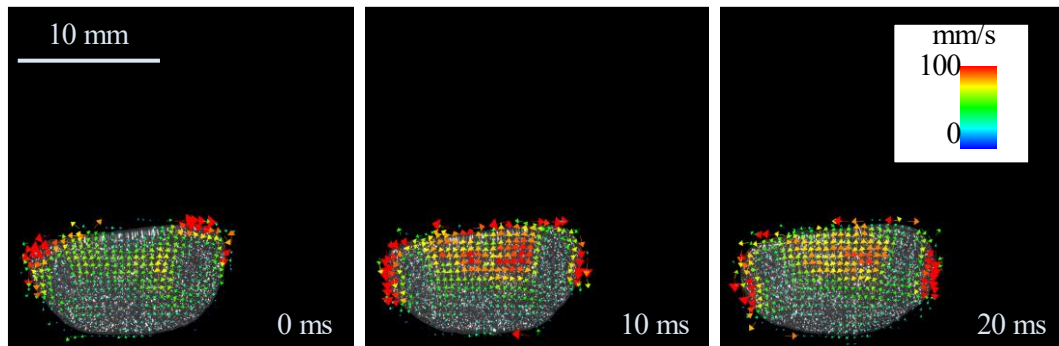


図 4-24 油滴内部流動 PIV 計測結果（画像処理後に計測を行った場合）

図 4-23 に示す油滴内部流動を可視化した画像を二値化し，多重露光することで図 4-25 (a)に示す油滴の内部における流跡線の画像を取得した．多重露光に用いた画像の枚数は一枚の流跡線画像につき 100 枚である．可視化結果からは速度場の結果や図 4-25 (b)に示す MELCOR が想定する気泡内流動と同様に，油滴の内部において一軸のトロイダル渦構造が存在することが可視化された．一方で，油滴の下部においては従来のモデルでは想定されていない流動存在することを発見した．

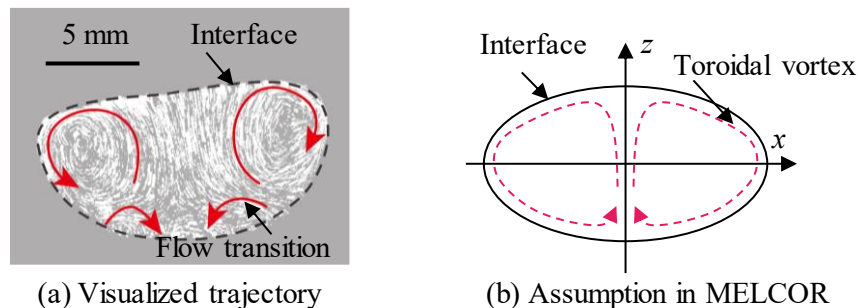


図 4-25 気泡内部の流跡線可視化結果および MELCOR が想定する流動の比較

図 4-25 (a)に示す油滴内部における流跡線に対してより定量的な評価を行うために，python の matplotlib ライブラリにおける streamplot を用いて PIV のベクトルデータから図 4-26 に示す

気泡の内部における瞬時の流跡線を取得した。流跡線の可視化結果からは図 4-25 (a)に示される流跡線と同様にトロイダル渦構造と共に、油滴の下部において複雑な流動場が発生していることが示された。本流動は時間と共に形態を変化すること、つまりは MELCOR が想定している定常な流れとは異なる流動の複雑な過渡的現象が生じていることが可視化結果から示された。さらに、油滴の上部におけるトロイダル渦の形状についても油滴の変形に伴い形状が変化することが示された。

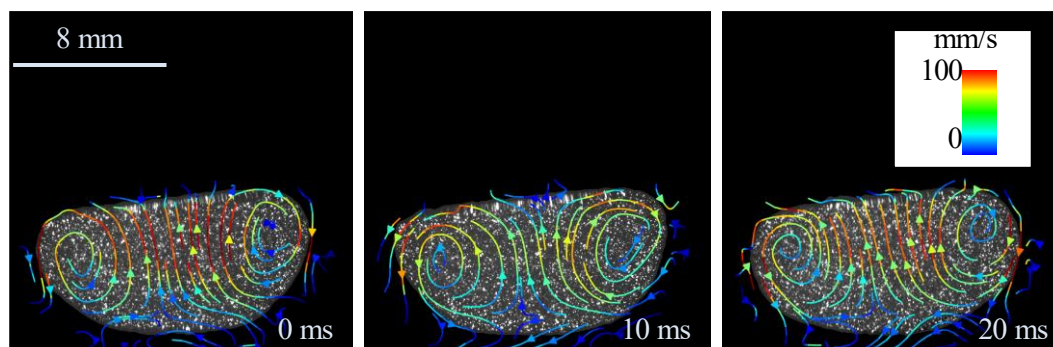


図 4-26 油滴の内部における瞬時流跡線

4.6.3. 局所遠心力速度の計算

4.6.2 項において得られた油滴内部流動のデータを MELCOR における内部流動モデルと定量的な比較を行う。PIV において得られた速度場分布のデータは油滴の内部から界面に渡って全体の速度場分布が得られる。一方で、MELCOR のモデルにおいては油滴の界面における微粒子速度である界面速度 (V_s)を定義している。PIV においては元画像の解像度と速度ベクトルの出力値が一致しないという性質があり、画像の可視化結果と PIV データの単純な比較を行うことはできない。そこで、本研究においては図 4-27 に示す画像処理手法を用いて界面における PIV の計測点を取得した。具体的な手法としては図 4-27 (a)に示す油滴の画像を図 4-27 (b)に示すように PIV グリッドの粗さまで解像度を落としてから図 4-27 (c)に示す二値化を行う。以上の二値化データから界面のピクセルを取得することで油滴の界面における PIV の計測点を取得する。

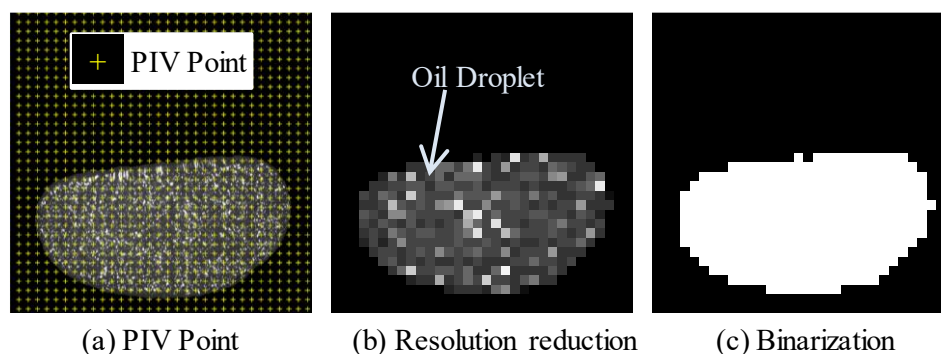


図 4-27 本研究において用いた気泡界面速度場計測の画像処理手法

図 4-28 (a)に油滴の界面における速度の計測点と検出されたグリッドを赤い丸で示す。計測結果は、実際の油滴の界面と良い一致を示すことが分かる。また、図 4-28 (b) に示すグラフは極座標表示のグラフとなっており、偏角は油滴内部における偏角 θ 、半径は油滴の界面速度 V_s をそれぞれ示す。図中のプロットは図 4-24 において示した油滴内部流動の平均値から界面の速度場として検出された速度場を青線で、式(1-10)において示される MELCOR における界面速度の式を用いて解析した速度場を赤線で示す。界面速度を導出する際の式の中で用いられる長辺 a 、短辺 b 、偏角 θ については図 4-27 (c)に示す気泡のコンター画像を用いて楕円フィッティングをした際の中心座標 (x_0, y_0) と界面の座標 (x, y) など図 4-29 に示す計測パラメータを用いて以下の用に計算する：

$$\theta_{Measure} = -1 * \text{atan}((y_0 - y)/(x_0 - x)) + \pi/2. \quad (4-18)$$

なお、上昇する油滴が傾いている場合が考えられるため、極座標 θ を計測する際には楕円フィッティングした際の油滴の偏角 θ_{Angle} から実際に計測された偏角 $\theta_{Measure}$ を以下のように差し引くことで実際の偏角を導出した：

$$\theta = \theta_{Angle} - \theta_{Measure} + \pi/2. \quad (4-19)$$

可視化結果からは実験から得られた界面速度の値に対して MELCOR における相関式がほぼ全領域において過大評価をしていることが示された。一方で、速度場分布そのものに関しては、油滴の長辺付近 ($\theta = 90^\circ, 270^\circ$)において最大値を取るなど、実験結果と解析値が定性的に一致するような傾向が見られた。また、特に油滴の下面付近 ($135^\circ \leq \theta < 225^\circ$)において MELCOR における相関式が実験値を大幅に過大評価する傾向が見られた。この傾向は油滴の下部においては気泡の後流が剥離することで MELCOR の想定する界面速度の駆動力が低下したことが原因であると考えられる。

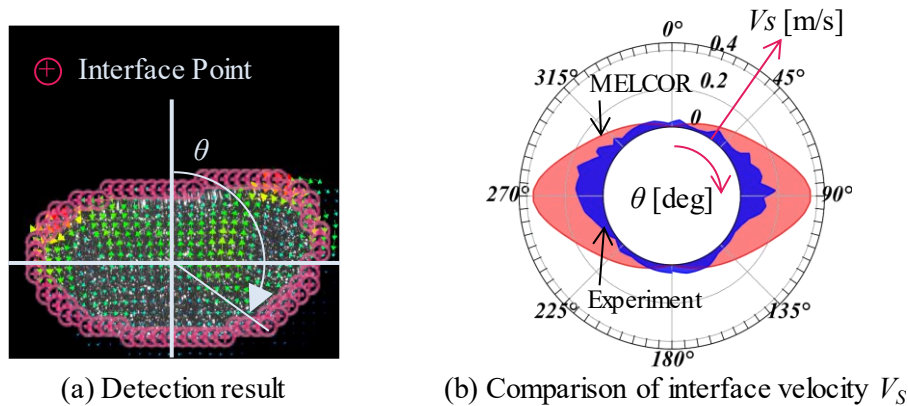


図 4-28 油滴内部流動における速度場の平均値から得られた界面速度 V_s の計測結果
(Blue line: 可視化実験により得られた速度; Red line: MELCOR における速度)

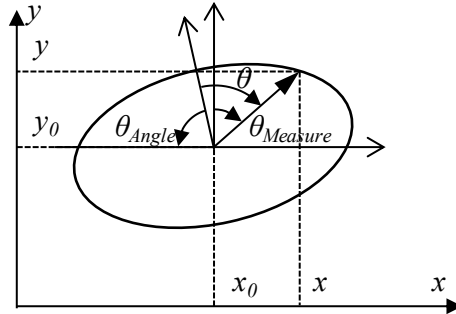


図 4-29 気泡計測における各パラメータの定義

図 4-30 に図 4-28 の界面速度の実験値を用いて計算された遠心力による物質係数 $V_{c,i}$ の局所値を示す。界面速度の計算においては式(1-11)に示す MELCOR における相関式を用いて計算を行った。その際、曲率半径 r_c は形状に関するパラメータは図 4-28 の極座標を計算した際に用いた長辺 a 、短辺 b 、偏角 θ を式(1-10)に代入することで計算した。カニングハムスリップ定数 S_i は以下の式:

$$S_i = 1 + \frac{2\lambda}{d} \left(A_1 + A_2 \exp\left(-\frac{A_3 d}{\lambda}\right) \right), \quad (4-20)$$

に Davis ら (1945) による空気中における係数 ($A_1 = 1.257, A_2 = 0.400, A_3 = 0.550$) を用い、平均自由行程 λ は大気圧条件における値 (68 nm) とした。微粒子の物性に関しては実験にて使用した FLUOSTAR 粒子の値を用いた。遠心力による物質係数は界面速度の二乗に比例し、曲率半径に反比例するため、計測結果からは気泡の長辺付近における値が最大となった。また、速度の値は界面速度などの値と比べて 3 オーダーほど低い値がみられたが、油と微粒子の密度差が非常に小さいために重力沈降による物質移動係数 $V_{g,i}$ が非常に小さいことが考えられる。

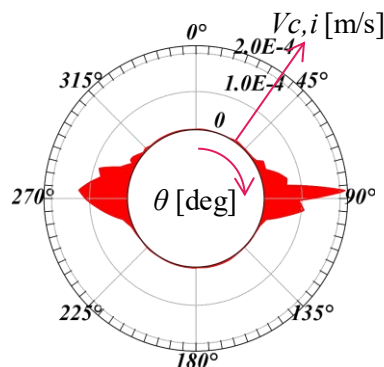


図 4-30 油滴内部流動における速度場の平均値から得られた遠心力による物質移動係数 $V_{c,i}$ の計測結果

図 4-31 に図 4-24 において求めた PIV データを元に界面速度 V_s と遠心力による物質移動係

数 $V_{c,i}$ を計測した結果を示す。計測結果からは平均値の計測結果である図 4-28 でみられた速度分布と同様に油滴の長辺付近において最大の値をとる。一方で、油滴の上面においては流動の変化が激しい傾向にあり、時間経過と共に流速分布が大きく変化する傾向にある。内部流動は MELCOR おいて定常とされる一方で、界面速度には無視できない範囲で影響することが分かる。また、流速の変化に伴い遠心力による物質移動係数も変化するが、油滴の長辺付近 ($\theta = 90^\circ, 270^\circ$) において最大値を取るなど図 4-30 に示す平均値から計算された遠心力による物質移動係数と同様の傾向をとる。これは、 $V_{c,i}$ が界面速度の他に曲率半径の影響も受けるため、速度場分布ほど大きく影響ができないからと考えられる。

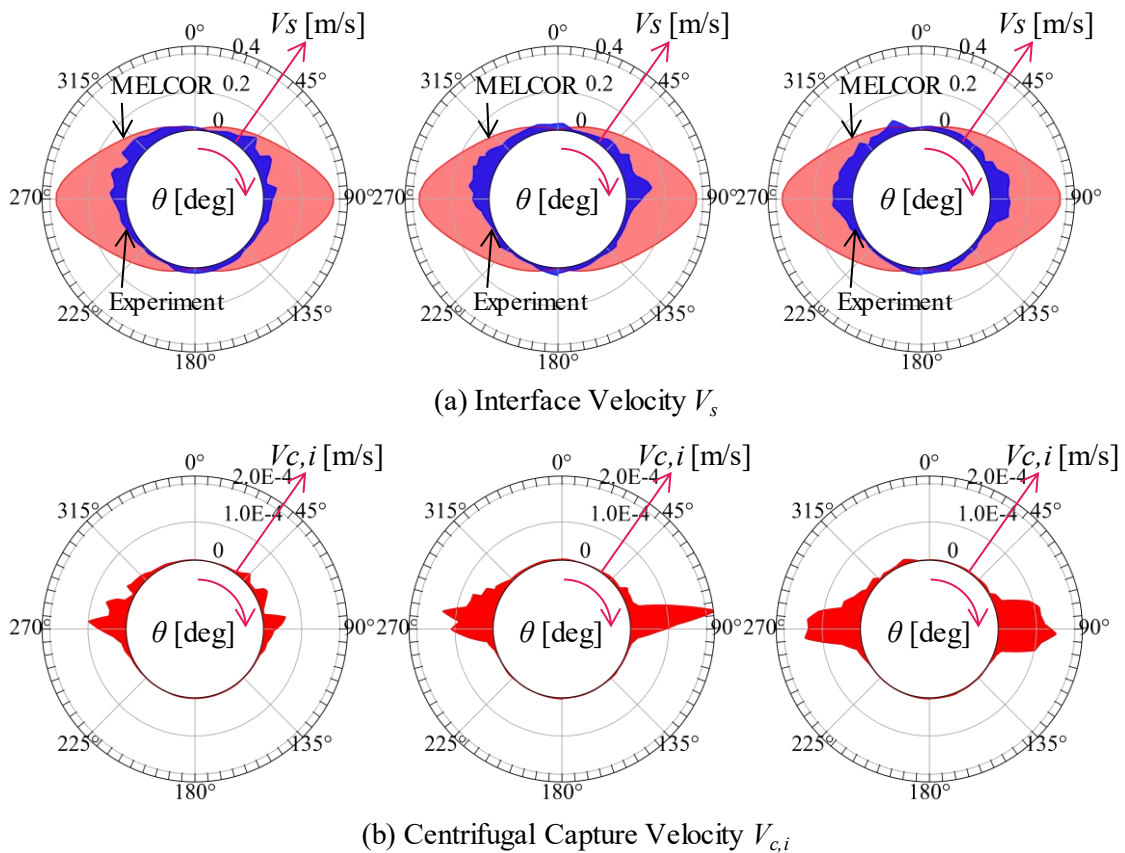


図 4-31 瞬時速度場情報から得られた界面速度 V_s および遠心力による物質移動係数 $V_{c,i}$

4.7. 微粒子除染現象可視化実験

4.7.1. 不溶性微粒子による微粒子除染現象の可視化

これまでの計測においては気泡の内部や界面に想定される流動を調べてきたが、最終的な DF を計測する上では気泡から流出する微粒子を計測することが重要である。そこで、図 4-7 に示す実験装置を用いて気泡から流出する微粒子の可視化計測を行った。気泡の内部に投入した微粒子は OX50 を Rhodamine B で着色したものである。図 4-32 に管内径 $d=3\text{ mm}$ の条件でノズル離脱後の条件（ノズルを原点として $z=0\text{ mm}$ ）における気泡から流出した微粒子の可視化結果を示す。撮影条件はシャッター速度 0.156 ms 、フレームレート 6400 fps 、解像度が 768×768 である。可視化結果からは気泡の射出と共に気泡の下面側から複数の粒子が同時に流出する挙動が見られた。

図 4-32 において可視化された微粒子に対して、気泡から除染された微粒子のみに背景差分処理をした結果を図 4-33 に示す。可視化結果を元に微粒子の速度場計測を行った結果を図 4-34 に示す。可視化結果からは気泡が上昇するにしたがい、気泡の後流に巻き込まれた微粒子が上昇する挙動が見られた。

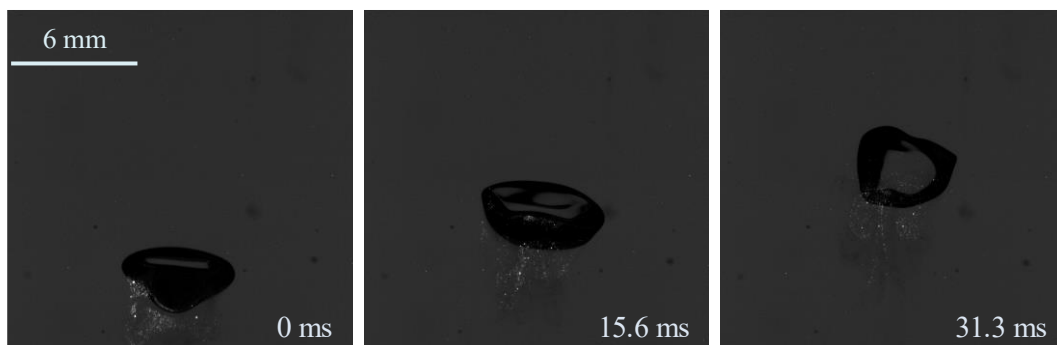


図 4-32 Rhodamine B で着色した OX50 粒子を投入した条件における気泡挙動の可視化結果 ($d=3\text{ mm}$) 撮影条件: Shutter speed: 0.156 ms , Frame rate: 6400 fps , Resolution: 768×768

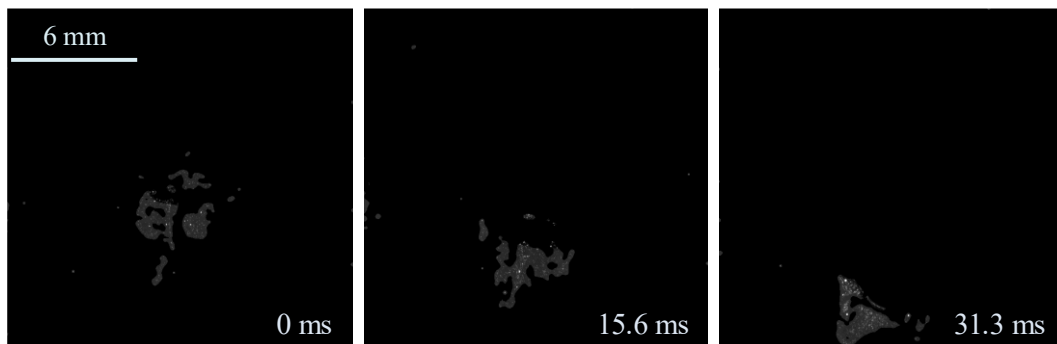


図 4-33 気泡の界面から流出した微粒子以外の背景差分処理結果

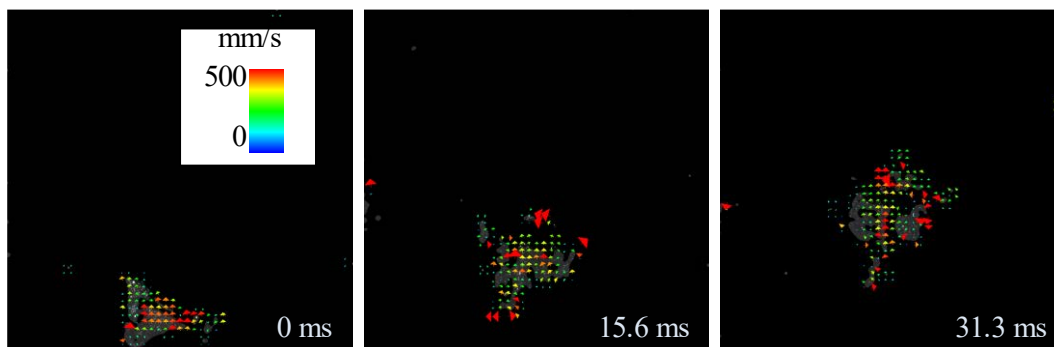
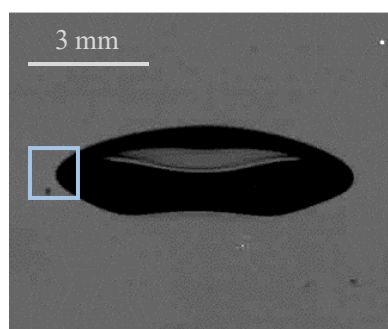
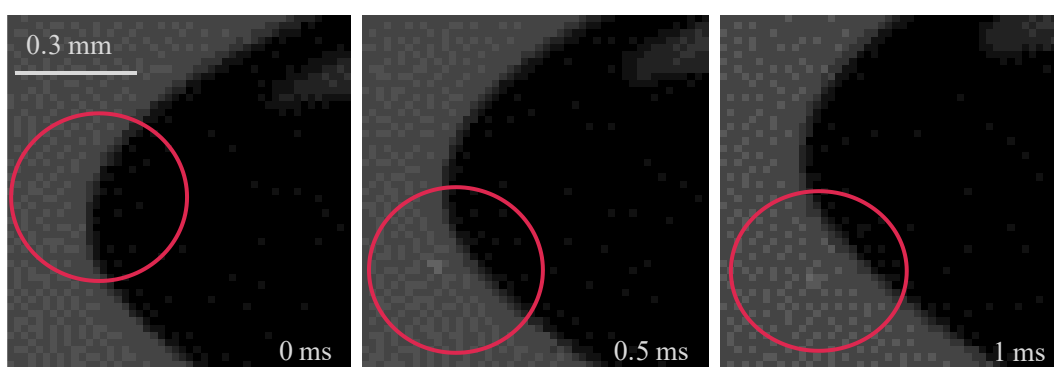


図 4-34 気泡から除染された微粒子の速度場計測結果

図 4-32 に示す条件をと同様の条件においてよりノズルから離れた位置（ノズルを原点として $z = 400 \text{ mm}$ ）における可視化計測を行った結果を以下の図 4-35 に示す．可視化結果においては気泡の長辺付近から微粒子が飛び出す挙動が可視化された．以上の結果は微粒子の局所物質移動係数が気泡の長辺付近において最大の値をとるとする図 4-30 の実験結果を基にした計算に対応する結果であり，気泡の曲率が小さく，外部流速が早い条件において界面に対する微粒子の法線方向速度が大きい値をとったためと考えられる．



(a) Visualization result



(b) Particle visualization result

図 4-35 定常上昇する気泡の界面から離脱するエアロゾルの可視化結果 ($d = 3 \text{ mm}$) 撮影条件: Shutter speed: 0.156ms, Frame rate: 6400fps, Resolution: 768×768

4.7.2. 干渉計による微粒子除染現象の可視化

図 4-34 や図 4-35 における微粒子の可視化においては気泡の周囲における微粒子の除去現象を定性的に示すことができたが、不溶性粒子の実験では界面から流出した微粒子の一つ一つに対する定量的な除去量を評価することは難しい。また、事故時の条件においては気泡の内部は CsI などの可溶性粒子で満たされていると考えられているものの、気泡の外部における溶解は直接可視化できない。そこで、液中に溶解した微粒子により周囲流体の物性が変化する性質を利用し、図 4-8 に示す二波長干渉計を用いて気泡周囲から流出する微粒子の濃度場を直接計測することとした。気泡の内部に投入した微粒子はグリセリンからなる水溶液を、スモーク発生機を用いて噴霧したものであり、物性などのデータは表 4-4 に示す。図 4-36 および図 4-37 にそれぞれ管内径 $d = 3 \text{ mm}$ の条件でノズル離脱後の条件（ノズルを原点として $z = 0 \text{ mm}$ ）において明視野と干渉縞の画像に対して二台のカメラを用いて同期撮影を行った可視化結果を示す。撮影条件はシャッター速度 0.25 ms 、フレームレート 4000fps 、解像度が 1280×1024 である。明視野の可視化結果からは気泡の界面から微粒子が流出するのに伴い、屈折率の変化にともなう黒い筋が気泡の後流において見られた。また、干渉縞の可視化結果においては明視野において黒い筋が見られた部分に、微粒子の濃度場変化に対応する干渉縞の乱れが可視化された。以上の可視化結果から、定量的な濃度場計測に必要な微粒子の濃度変化による干渉縞画像を取得できることが示された。

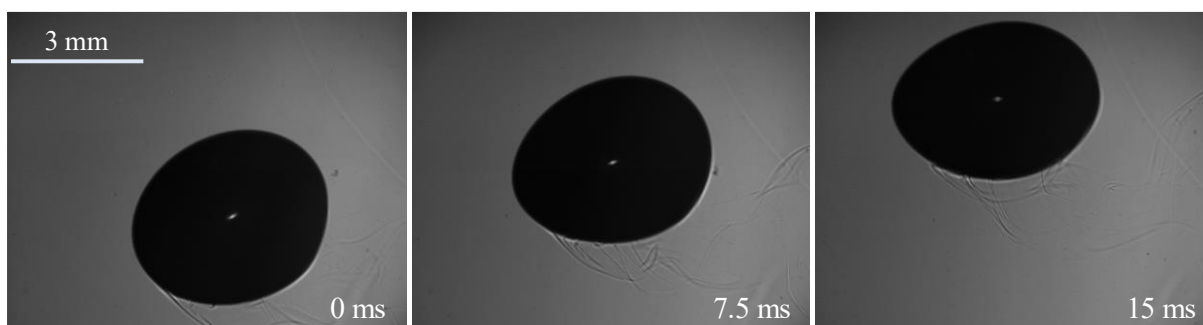


図 4-36 明視野計測可視化結果 (wavelength = 600 nm; 干渉縞本数 18 本; $d = 3 \text{ mm}$) 撮影条件: Shutter speed: 0.25ms, Frame rate: 4000fps, Resolution 1280×1024

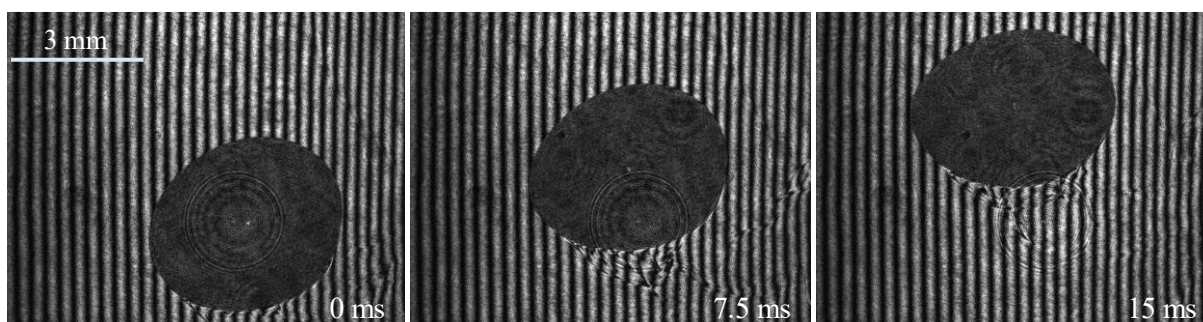


図 4-37 干渉縞計測可視化結果 (wavelength = 532 nm; 干渉縞本数 18 本; $d = 3 \text{ mm}$) 撮影条件: Shutter speed: 0.125ms, Frame rate 4000fps, Resolution 1280×1024

4.7.3. フーリエ変換法および機械学習による微粒子除染現象の計測

図 4-36 および図 4-37 以上に示す一連の計測データに対して、Keris ら(1986)^[14]によるフーリエ変換法および Herráez ら(2002)^[15]による信頼度ソート法位相アンラッピングに、本研究において新たに開発した機械学習による位相抽出手法および画像処理を組み合わせ、気泡画像のフィルタリングを行うこと気泡の周囲における位相の瞬時データを取得した。一連の計測結果を図 4-38 に示す。気泡周囲の位相場計測結果からは微粒子の除去によって気泡の周囲に微粒子の濃度場が存在することが示された。気泡の右上の部分においても筋のような濃度場変化が見られるが、気泡の上昇とともに形状が変化しないことから一つ前の気泡が通過した際に残った微粒子と考えられる。画像の左端においては局所的に位相の値が大きくなる部分が見られるが、これは水平方向でしか見られないことから位相場計測の際に生じたエラーと考えられる。干渉縞画像の境界においては干渉縞の微妙な変化によってレファレンス画像と比較ができない部分が出現するが、本計測で気泡が通過する部分には大きな影響がないと考えられる。計測結果からは気泡から除去された微粒子の濃度場は気泡の周囲において時間と共に変化し、また除去された後の微粒子が気泡の後流に取り込まれて滞留していることが示された。

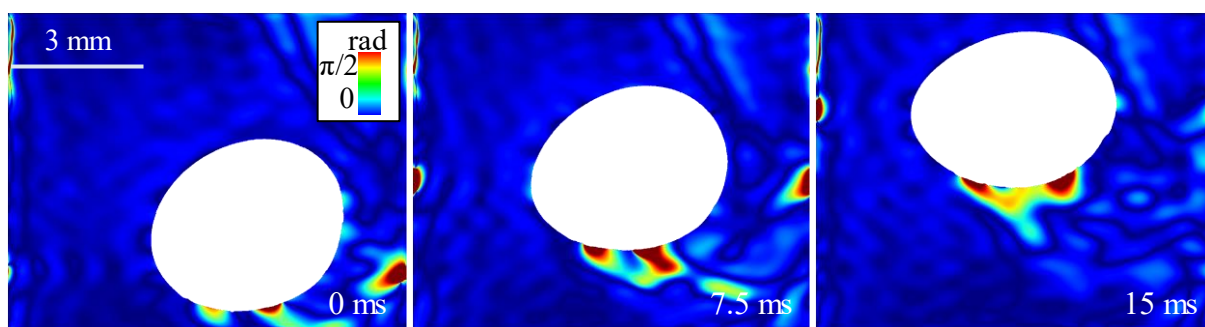


図 4-38 気泡から除染された微粒子の位相場計測結果

4.7.4. 気泡界面における微粒子除染現象の計測

微粒子の除染現象を詳細に計測するために気泡界面における位相情報の抽出を行った。図 4-39 に位相情報の抽出を行う際の偏角 θ の定義を示す。実気泡は理想的な楕円形ではないため、気泡の外形に対して楕円フィッティングを行い、気泡の中心座標 (x_0, y_0) や偏角 θ を計算する。偏角の計算は式(4-1)、及び式(4-2)の手法を用いて行った。

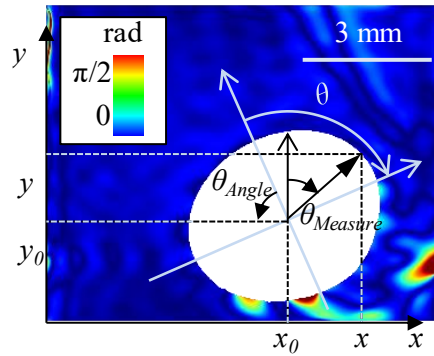


図 4-39 気泡か気泡界面の位相場計測における偏角 θ の定義

図 4-40 に図 4-38 の計測結果を元に、気泡の界面における位相場 P_θ を計測した結果を極座標系でプロットした結果を示す。計測結果からは微粒子の除去が気泡の全周に渡って行われており、また除去現象は非定常であるものの、気泡周囲におけるピークの位置はどの時間においても同様の傾向を示すことが分かる。位相場の計測結果からは特に気泡の下面付近において顕著な位相のピークが見られるが、これは図 4-38 に示した気泡の下面における微粒子の滞留が原因であると考えられる。一方で、気泡の下面における位相のピークは楕円フィッティングした際の気泡の下面 ($\theta = 180^\circ$) ではなく、傾いた位置に分布している傾向が見られるが、これは気泡が上昇する際に気泡形状と運動方向が違うことに起因する現象と考えられる。

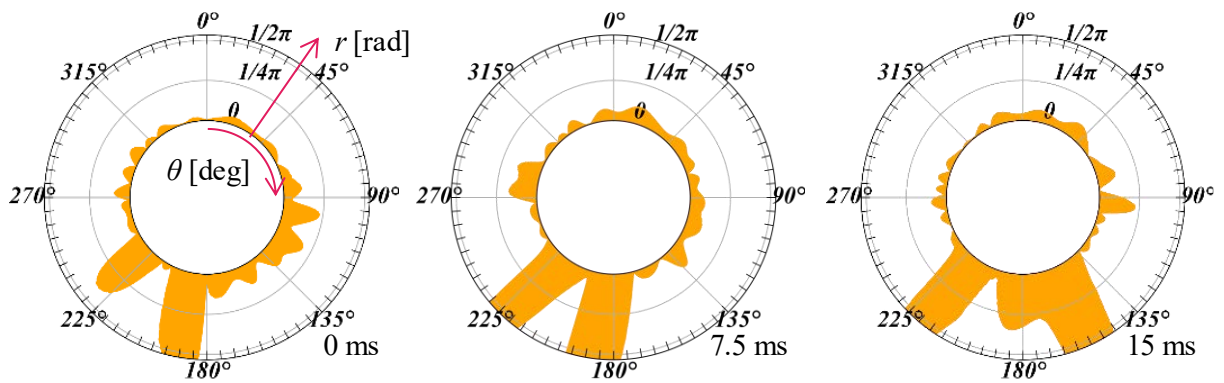


図 4-40 気泡の界面における微粒子の位相場計測結果

図 4-41 に図 4-40 で得られた微粒子位相場 (P_θ) の瞬時値を時間平均した結果を示す。時間平均は計測の各時間ステップを n 、全ステップの数を N として以下のように表される：

$$\bar{V}_\theta = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N V_{\theta,n}. \quad (4-21)$$

以上の結果からは、平均値をとった場合においても気泡の界面においては下面における微粒子の濃度が卓越することが示された。気泡の界面側において微粒子の濃度が高い理由としては微粒子の除染が気泡の下面側で卓越していることや、気泡の後流渦に巻き込まれた微粒子が気泡の後

流に長時間滞留している可能性が考えられる。

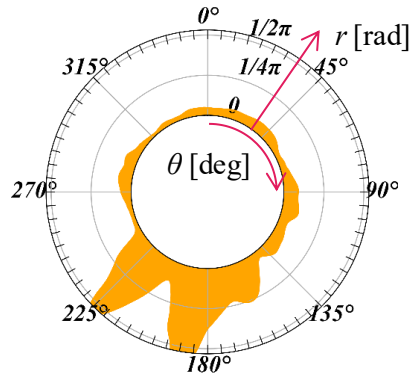


図 4-41 気泡の界面における微粒子位相場の時間平均

4.7.5. 干渉計実験装置における速度場計測技術の検討

干渉計を用いた気泡周囲の計測においては気泡の周囲における詳細な微粒子濃度の計測に成功したものの、気泡周囲における微粒子濃度分布は移流成分によるものが支配的である可能性が示された。移流成分を評価するためには気泡周囲における液相の速度場計測が必要である。そこで、既存の干渉計に速度場計測を行うための装置を追設した光学系を構築した。本研究で微粒子濃度に対応する位相および速度場の同時計測用いた図 4-42 に示す。従来の干渉計に加えて液相に蛍光トレーサー粒子を投入し、パルス発行するシートレーザーで蛍光光を誘起することで蛍光トレーサー粒子の可視化を行う。可視化された蛍光粒子は干渉縞に影響することなく、明視野観察の光学系のみに移りこむようにする必要がある。本光学系は光の波長を用いて明視野と干渉縞の切り分けを行うため、蛍光粒子の蛍光光が明視野の波長と近い粒子(FLUOSTAR, EBM 社製)を選択した。

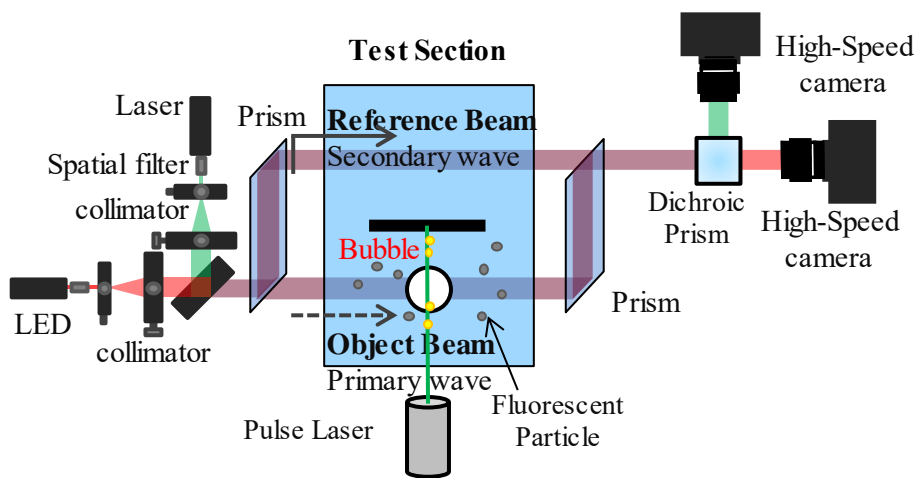


図 4-42 位相および速度場の同時可視化計測に用いた光学系

蛍光粒子の計測において特に課題となるのは明視野および干渉縞計測の切り分けである．本光学系では誘電体鏡を用いて光の切り分けを行う．図 4-43 に本実験で使用したダイクロイックミラーの光学特性を示す．青色で示す蛍光光全体の強度分布に対し，橙色で示す反射側の線が明視野側の光を，緑色で示す透過側の線がレーザー側に入射する光を示す．分光特性は蛍光粒子の蛍光強度を $A(\theta)$ ，ダイクロイックミラーの P 波反射割合を $R(\theta)$ ，P 波透過割合を $T(\theta)$ として，以下のように計算した：

$$\begin{aligned} A_{\theta,R} &= A(\theta) \times R(\theta) \\ A_{\theta,T} &= A(\theta) \times T(\theta) \end{aligned} \quad (4-22)$$

光学特性のプロットからは，ダイクロイックミラーが蛍光光を反射側のみ全て通し，透過側を十分カットできていることがわかる．

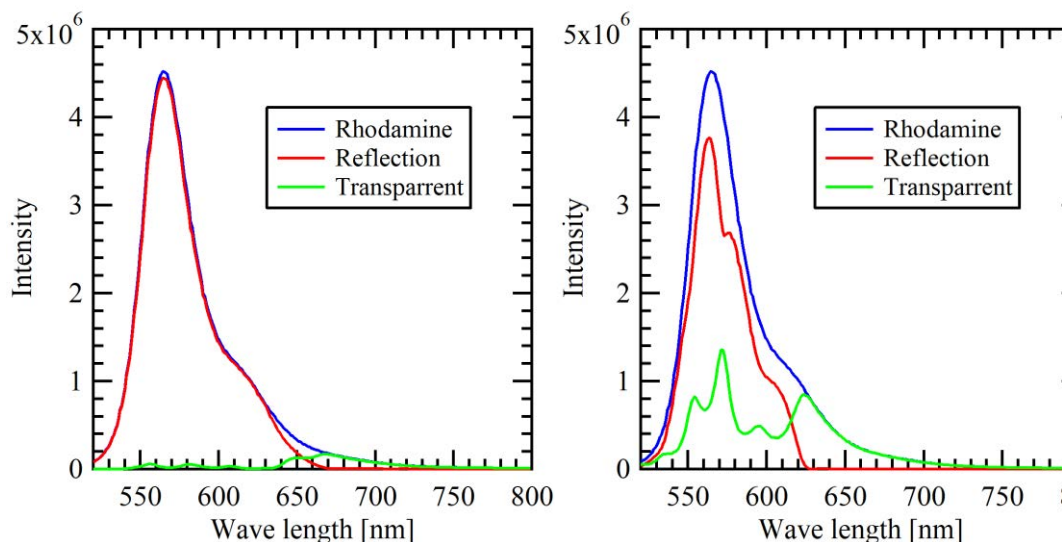


図 4-43 本光学系で用いたダイクロイックミラーの分光特性評価

図 4-44 および図 4-45 に管内径 $d = 3 \text{ mm}$ の条件でノズル離脱後の条件（ノズルを原点として $z = 0 \text{ mm}$ ）において明視野と干渉縞の画像に対して二台のカメラを用いて同期撮影を行った可視化結果を示す．撮影条件はシャッター速度 0.1 ms ，フレームレート 1000 fps ，パルスレーザーのストロドルが 0.7 ms ，解像度が 1024×1024 である．本条件においては気泡の内部に粒子は投入せず，空気気泡の状態での撮影を行った．明視野の可視化結果からは気泡の周囲においてレーザーにより励起された PIV 粒子の可視化撮影に成功した．しかしながら，図中の画像からわかるように気泡周囲の粒子はぼやけるような画像が得られた．また，干渉縞の計測結果からは，光路の中に微粒子を混入した状態においても干渉縞の計測に問題がないことを確認した．これは，微粒子が光路上に存在するにもかかわらず，微粒子が十分に小さいために干渉計において光路を阻害することなく可視化を行うことができたからと考えられる．

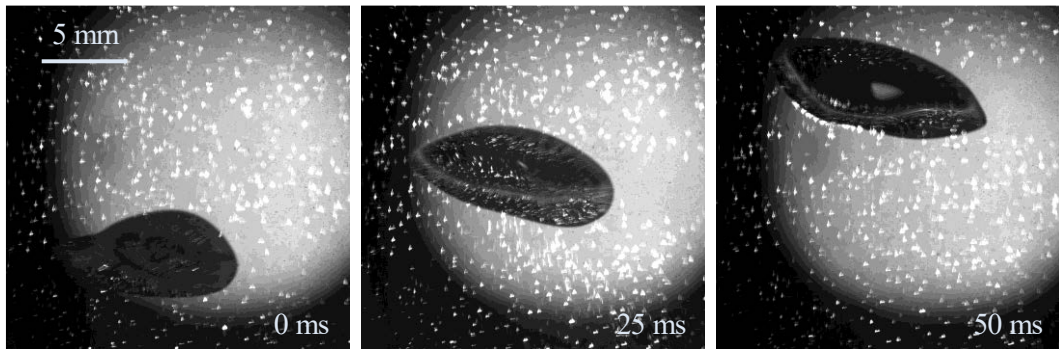


図 4-44 ダイクロイックミラーを用いた蛍光粒子および気泡挙動の可視化

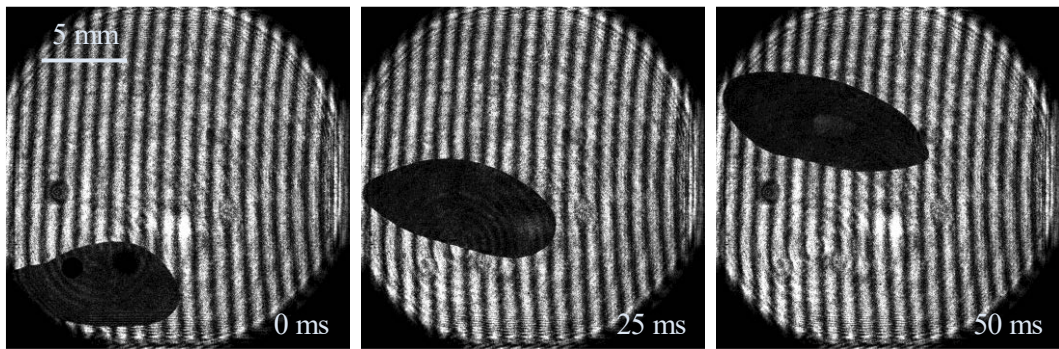


図 4-45 ダイクロイックミラーを用いた条件における干渉縞の可視化

微粒子の可視化画像が結像しない理由を考察するため、ダイクロイックミラーの光路図を図 4-46 に示す。ダイクロイックミラーは空気とコートが高屈折率であるため、高い分光特性が得られる一方でコートが薄膜状であるために内部反射が生じる可能性が考えられる。そのため、コートの上表面と下表面のそれぞれにおいて光が反射することにより光路差が生じると考えられる。そこで、本実験においては光学特性を改善するために構造上、内部反射が生じにくいダイクロイックプリズムを使用することとした。

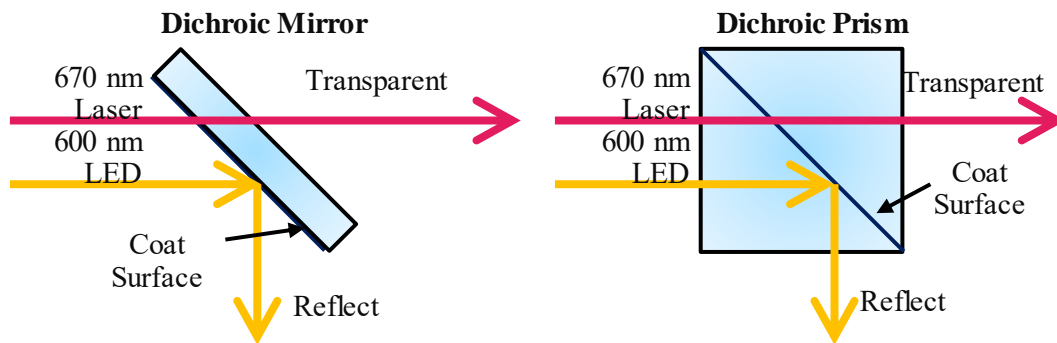


図 4-46 ダイクロイックミラーおよびプリズムの光路の違い

図 4-47 に本実験で使用したダイクロイックプリズムの光学特性を示す。青色で示す蛍光光全体の強度分布に対し、橙色で示す反射側の線が明視野側の光を、緑色で示す透過側の線がレーザー側に入射する光を示す。分光特性は式(4-8)を用いて計算した。光学特性のプロットからは、ダイクロイックプリズムが図 4-43 に示すダイクロイックミラーと比べて蛍光光が透過される割合が大きくなり、分光特性が落ちることがわかる。しかしながら、蛍光光のピークである波長 550-600 nm における光の反射量が十分に確保できると判断したため、本研究においてはダイクロイックプリズムを使用することとした。

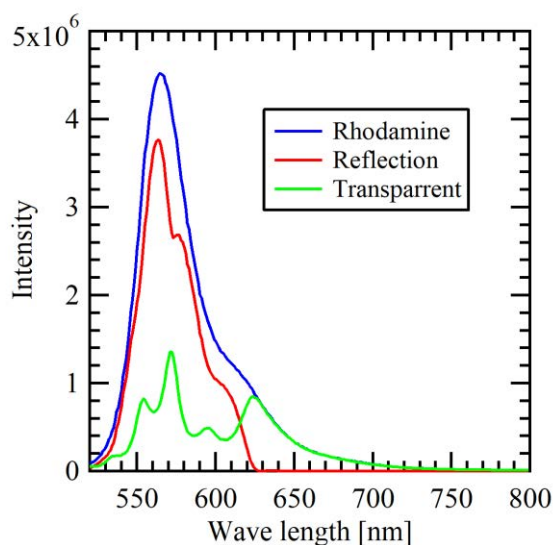


図 4-47 本光学系で用いたダイクロイックプリズムの分光特性評価

図 4-48 および図 4-49 に管内径 $d = 3 \text{ mm}$ の条件でノズル離脱後の条件 (ノズルを原点として $z = 0 \text{ mm}$) において明視野と干渉縞の画像に対して二台のカメラを用いて同期撮影を行った可視化結果を示す。撮影条件はシャッター速度 0.1 ms 、フレームレート 1000 fps 、パルスレーザーのストラドルが 0.7 ms 、解像度が 1024×1024 である。本条件においては気泡の内部に CsI 粒子は投入した状態で撮影を行った。明視野の可視化結果からは気泡の周囲においてレーザーにより励起されたトレーサー粒子の可視化撮影に成功した。図 4-44 における可視化結果と比較し、蛍光粒子が点として結像することが確認された。また、干渉縞の計測結果からは、光路の中に微粒子を混入した状態においても干渉縞の計測に問題がないことが確認できた。

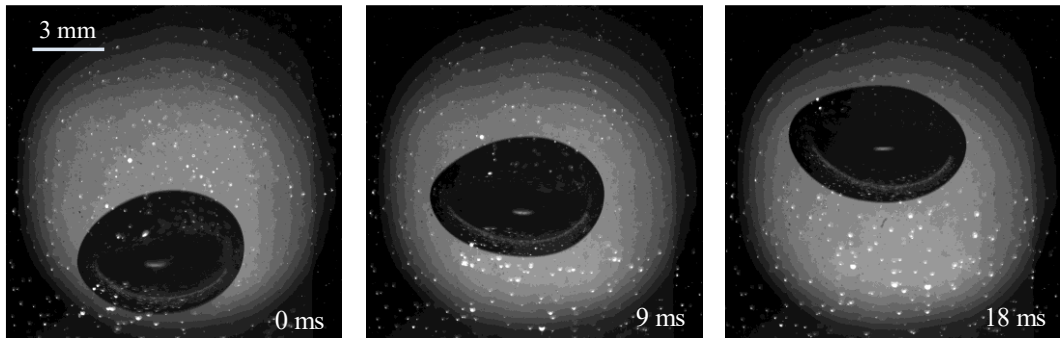


図 4-48 ダイクロイックプリズムを用いた蛍光粒子および気泡挙動の可視化

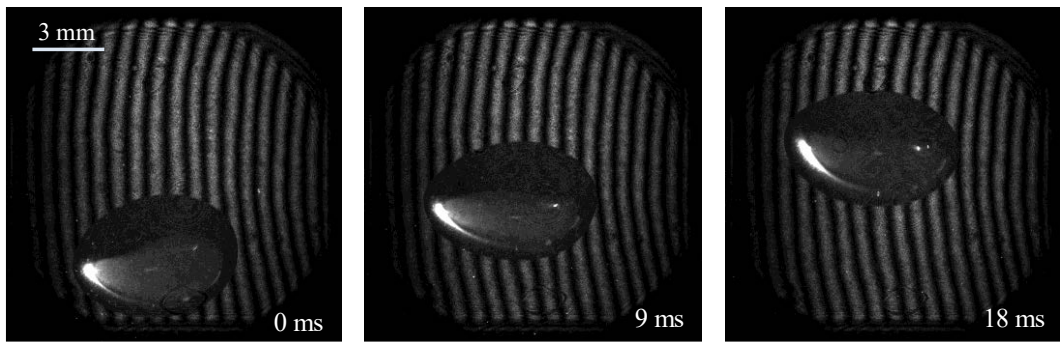


図 4-49 ダイクロイックプリズムを用いた条件における干渉縞の可視化

4.7.6. 干渉計による速度場および濃度場の同時計測

図 4-48 および図 4-49 において可視化した画像を基に干渉計の明視野画像から PIV により速度場観察を行った結果を図 4-50 に、位相場の計測結果を図 4-51 にそれぞれ示す。速度場の計測結果からは気泡の周囲におけるトレーサー粒子の画像から気泡周囲における液相の速度場を計測できることを確認した。また、気泡周囲における微粒子の濃度場の計測も行った。計測結果からは気泡周囲における蛍光粒子の影響は確認されず、データ処理を行うことに成功した。速度場と位相場の計測結果からは、特に後流の上昇流が大きい部分において微粒子の濃度が濃い傾向がみられた。可視化結果からは、気泡の後流において微粒子が滞留し、濃度の高い領域が存在することが示された。

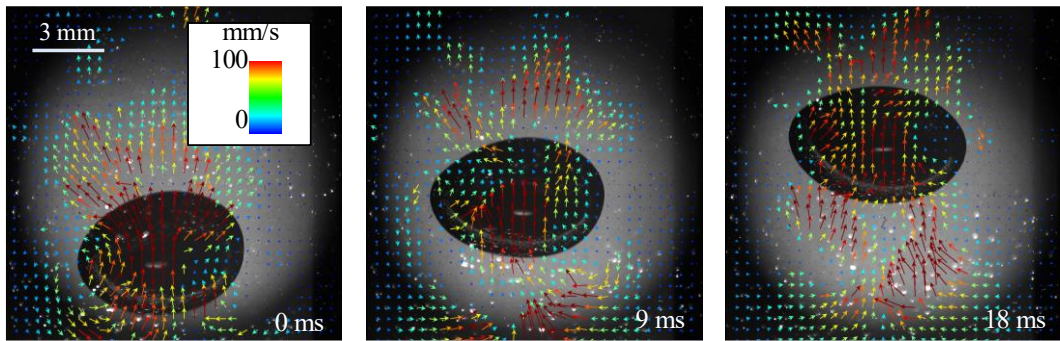


図 4-50 ダイクロイックプリズムを用いた気泡周囲における流動の計測結果

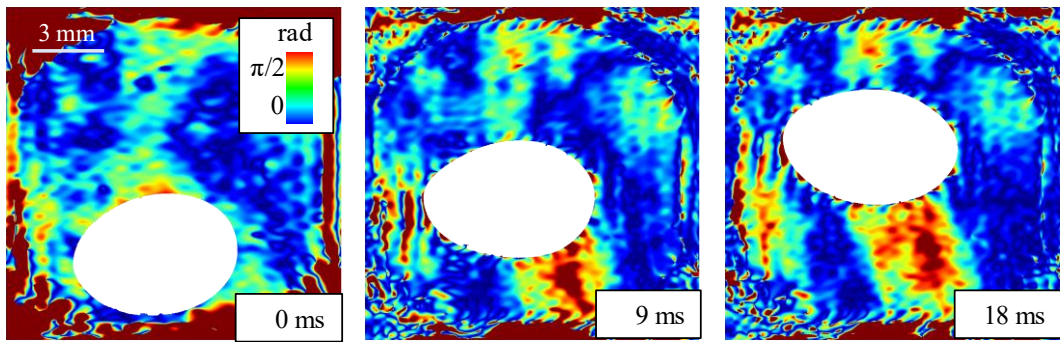


図 4-51 速度場と同時に位相場を計測した結果

4.8. 微粒子除染現象および内部流動の考察

図 4-30 において得られた遠心力による物質移動係数 $V_{c,i}$ の平均値と、気泡の界面における微粒子位相場の差分値の絶対値の平均をプロットしたものを図 4-52 に示す。グラフは極座標表示で偏角 θ および動径に位相の差分の絶対値を緑のプロットで、遠心力による物質移動係数を緑のプロットで示す。比較結果からは以気泡の長辺付近 ($\theta=100^\circ, 270^\circ$) におけるピークの位置が良い一致を示すことが分かる。油滴を用いた実験においては図 4-31 に示すように気泡の揺動や変形により界面速度 V_s が変化し、そのことで遠心力による物質移動係数が大きく変化することで微粒子の除去量に大きな影響を与える可能性が示された。以上のことから、本計測により、従来のモデルが前提としない気泡の揺動や変形といった要素が微粒子の除去量に大きく影響することが示唆された。

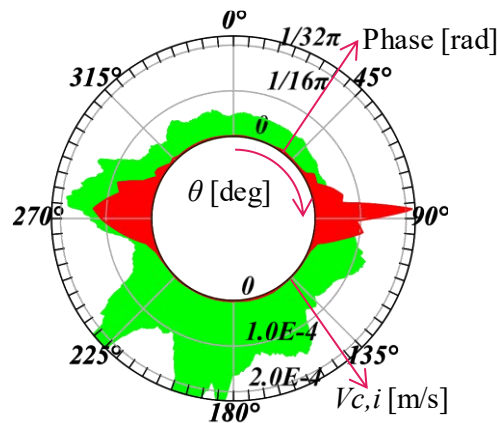


図 4-52 気泡の界面における微粒子の位相場差分値の絶対値の平均および遠心力による物質移動係数 $V_{c,i}$ の比較 (phase: green plot, centrifugal velocity: red plot)

4.9. 単一気泡中のエアロゾル挙動測定実験のまとめ

本研究はプールスクラビング時のエアロゾル挙動を可視化することでプールスクラビングのメカニズムを解明することを目的として、単一気泡上昇挙動可視化実験、油滴を用いた内部流動可視化実験、微粒子除染現象の可視化実験を行い、得られた結果を基に微粒子除染現象および内部流動の考察を行った。実験結果からは、以下のような知見が得られた。

【単一気泡上昇挙動可視化実験】

- ・ 湿式の CsI エアロゾル発生装置およびミストジェネレータを用いてグリセリン水溶液の粒子を発生し、エアロゾル濃度が希薄な状態において、可溶性粒子が気泡上昇速度や形状に及ぼす影響を調査した。
- ・ 本年度新たに実験したグリセリン水溶液を用いた条件は湿式の CsI と同様の傾向が得られたものの、湿式の CsI 条件においては可溶性粒子を用いたにもかかわらず、乾式の CsI よりも不溶性粒子などと同様の傾向をとった。
- ・ 本年度新たに実験した湿式の CsI 粒子およびグリセリン水溶液を用いた条件では可視化画像と同様に、アスペクト比の大幅な変化は確認できなかった。

【油滴を用いた内部流動可視化実験】

- ・ 気泡の模擬流体として油滴の内部流動を計測することで MELCOR における内部流動モデルの妥当性を検証した。今年度は特に油滴の内部において生じる流動の過渡的变化に着目して実験を実施した。
- ・ 滴の上面においては流動の変化が激しい傾向にあり、時間経過と共に流速分布が大きく変化する傾向にある。内部流動は MELCOR おいて定常とされる一方で、界面速度には無視できない範囲で影響することが分かる。
- ・ 流速の変化に伴い遠心力による物質移動係数の計算結果が変化するものの、油滴の長辺付近 ($\theta = 90^\circ, 270^\circ$)において最大値を取るなど流速の平均値から計算された遠心力による物質移動係数と同様の傾向をとる。これは、 $V_{e,i}$ が界面速度の他に曲率半径の影響も受けるため、速度場分布ほど大きく影響ができないからと考えられる。

【微粒子除染現象の可視化実験】

- ・ 干渉計を用いてエアロゾルを含む気泡の上昇挙動を撮影し、フーリエ変換法を用いて微粒子の濃度場を位相情報として抽出する手法の構築を行った。また、画像処理技術と機械学習を組み合わせることでハイスピードカメラによる時系列データを処理する手法を開発した。
- ・ 明視野の可視化結果からは気泡の界面から微粒子が流出するのに伴い、屈折率の変化にともなう黒い筋が気泡の後流において見られた。また、干渉縞の可視化結果においては明視野において黒い筋が見られた部分に、微粒子の濃度場変化に対応する干渉縞の乱れが可視化された。以上の可視化結果から、定量的な濃度場計測に必要な微粒子の濃度変化による干渉縞画像を取得できることが示された。
- ・ 気泡周囲における微粒子濃度場に対応する位相場計測結果からは気泡から除去された微粒子の濃度場は気泡の周囲において時間と共に変化し、また除去された後の微粒子が気泡の後流に取り込まれて滞留していることが示された。

- ・ 気泡の界面における位相場を計測した結果からは、微粒子の除去が気泡の全周に渡って行われており、また除去現象は非定常であった。一方で、気泡周囲におけるピークの位置はどの時間においても同様の傾向を示す。
- ・ 速度場と濃度場の同時計測を行うため、干渉計にシートレーザーとダイクロイックプリズムを加えた光学系を構築した。明視野の可視化結果からは気泡の周囲においてレーザーにより励起された PIV 粒子の可視化撮影に成功した。干渉縞の計測結果からは、光路の中に微粒子を混入した状態においても干渉縞の計測に問題がないことが確認できた。
- ・ 速度場と位相場の計測結果からは、特に後流の上昇流が大きい部分において微粒子の濃度が濃い傾向がみられた。可視化結果からは、気泡の後流において微粒子が滞留し、濃度の高い領域が存在することが示された。

【微粒子除染現象および内部流動の考察】

- ・ 内部流動と除染現象の比較を行った。油滴を用いた実験においては気泡の揺動や変形により界面速度 V_s が変化し、そのことで遠心力による物質移動係数が大きく変化することで微粒子の除去量に大きな影響を与える可能性が示された。以上のことから、本計測により、従来のモデルが前提としない気泡の揺動や変形といった要素が微粒子の除去量に大きく影響することが示唆された。

5. 気泡の二相流挙動評価実験

本研究においては平成 30 年度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）の試験実施要領において定められる，以下 5.1 節及び 5.2.1 項の内容について試験を行った。

5.1. 実験装置の改良及び実験実施

エアロゾルを含んだ二相流挙動の把握のため，実機相当を含む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の特定を目指す。

本実験では，プールスクラビング時の二相流挙動の把握のため，エアロゾル無し及び有りの条件においてプール中にガスを連続的に噴出させることで，実際のプールスクラビングと同等の条件の下で多数の気泡が上昇する際の二相流動様式を同定するとともに，ボイド率，界面積濃度，気泡の合体・分裂などの特徴的な流動及び気泡形状，気泡径分布，気泡塊の平均上昇速度などの気泡挙動特性，さらにそれらとエアロゾル挙動の計測及び分類を行う。表 5-1 に実験の基本仕様を示す。図に示すように，水を溜めた実験部容器内に実機相当条件を模擬したガスを流入させる。ガスの上昇過程における二相流動の変化を，高速度カメラやボイド率測定装置等を用いて計測する。具体的な計測項目は表 5-1 に示す。

今年度は，昨年度までに整備した実験装置を改造し，蒸気凝縮対策等を施し，蒸気を含んだガスの噴流部から水面での放出過程に至るまでの二相流動様式ごとに二相流動の更なる高精度な計測を行う。また，ガス流量やサブマージェンス等のパラメータを変化させ，実験部出入口におけるエアロゾル計測を行うことで，エアロゾル除去効果を支配する二相流動様式やメカニズムを検討する。その際，可溶性を含む様々なエアロゾルを用い，エアロゾル種類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二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の改良を目指す。

5.2. 実験データの整理

5.2.1. 二相流実験基本仕様について

採取したデータについて，気泡界面の変形などによる界面とエアロゾル粒子との相互作用に関し，気泡放出部から上昇過程，水面での破裂に至るまでの気泡移動に係る流動様式ごとに検討し，エアロゾル除去に重要なパラメータを抽出して実験データを整理する。さらに，整理したパラメータを用いて界面変動等に起因するエアロゾル除去効果について，流動様式に応じたモデル化の方法を検討する。

表 5-1 気泡の二相流実験基本仕様

項目	内容	備考
装置構成	実験部容器, コンプレッサあるいは窒素ポン ペ, ボイラ, エアロゾル供給系, エアロゾル計 測系, 排水処理系	
計測機器	高速度カメラ, PIV 等	実験計画及び予備実験に より検討する.
実験条件	大気圧, 常温~100°C	
作動流体	水-空気 (窒素) 水-蒸気 水-蒸気-難溶解性エアロゾル (上記 3 条件はスケーリング特性の確認のため, 水以外の作動流体も考慮可) 水-蒸気-非凝縮性ガス-難溶解性エアロゾル	
実験パラ メータ	<ul style="list-style-type: none"> • ガス噴出し方向: 下, 横, 上 • 穴形状: 円 (基本), 破損口形状 (適宜, 理想化) • 口径: 3 種類 (クエンチャ, ベント管を模擬し, スケーリングを考慮して寸法決定) • ガス流出速度: 0.1~1 m/s 弱 • 非凝縮性ガス濃度: 0~100% • エアロゾルの組成・粒径・濃度 • サブクール度: 液温が常温から飽和温度までの範囲 (高さ方向に大きな温度勾配を設定する実験条件も含む) • サブマージェンス: 100mm 弱~1000mm 強 	
計測項目	<ul style="list-style-type: none"> • 気泡形状等 (気泡の重心位置, 重心軌道及び径, 界面形状等を評価) • 気泡及びエアロゾル粒子の速度分布 • エアロゾル濃度及びその変化 (気泡内外) • 液温及び気相温度 (実験装置内で複数点, 大まかな空間分布) • 液相内で温度成層を形成させる場合には, 高さ方向の液温温度分布 (詳細分布) 	全て時間変化を計測.

5.2.2. 本研究で対象としている二相流流動現象

気泡の二相流挙動に関する研究では図 4-3 に示した MELCOR における二相流動モデルを対象として気相噴流挙動およびエアロゾル挙動に着目している。ベント管出口ではグロービュールと呼ばれる大気泡が形成される。グロービュール形状はベント管形状や流入ガス流量等に依存するとされており、グロービュールはその初期径の 12 倍の距離を上昇する間に線形的に分裂するとされて

いる。グローブールについては i)蒸気凝縮に伴うステファン流, ii)粒子の気液界面への慣性衝突, iii)ガス噴射中の遠心力・拡散・重力沈降による微粒子除去が考えられている。

下流のスウォーム上昇領域においては微細化した小気泡群が合体と分裂を繰り返しながら上昇していく。スウォーム上昇領域における気泡群の上昇速度や気泡形状は気泡径に依存するとされている。気泡径は流入ガスの蒸気および非凝縮性ガスのモル分率をパラメータとして一意に定められる。よって上昇速度および形状もまた一定として仮定される。このような気泡群中の一つの気泡について 4.3.1 項で述べられているような微粒子除去メカニズムが考えられている。

5.2.3. 着目パラメータとそれらを計測するための実験計画

5.2.2 項で述べたような流動モデルを評価し、さらに詳細な挙動を把握するために表 5-2 に示すようなパラメータに着目し実験を実施した。気泡径や気泡形状、気泡上昇速度の計測は二相流動モデルそのものの妥当性および単一気泡モデルの適応可能性を評価する上で重要である。さらにモデルよりも詳細な実現象自体を把握するために蒸気凝縮挙動やエアロゾル挙動を可視化計測した。今年度は特に作動流体（水、空気、蒸気、エアロゾル）の条件（温度、流量、物性等）を幅広くパラメータとして実験を実施し、二相流挙動を把握しその影響を評価するとともに、除染係数計測を実施するためにガスの噴き出し方向を上向き、穴形状を円に限定した。

表 5-2 実験一覧

着目パラメータ	使用実験装置	作動流体	実験
気泡径	二相流実験装置	水-空気, 水-蒸気-空気, 水-空気-エアロゾル	可視化実験 WMS 計測
気泡形状, アスペクト比	二相流実験装置	水-空気, 水-蒸気-空気, 水-空気-エアロゾル	可視化実験 WMS 計測
気泡上昇速度	二相流実験装置	水-空気, 水-蒸気-空気, 水-空気-エアロゾル	WMS 計測
蒸気凝縮挙動	薄型水槽 二相流実験装置	水-蒸気, 水-蒸気-空気, 水-蒸気-空気-エアロゾル	可視化実験 WMS 計測
温度成層化挙動	二相流実験装置	水-蒸気	温度計測
気相噴流中のエアロゾル挙動	薄型水槽 二相流実験装置	水-空気-エアロゾル	可視化実験
除染係数	二相流実験装置	水-空気-エアロゾル	エアロゾル濃度計測

5.3. 二相流実験装置および実験手法

5.3.1. 二相流実験装置の概要

気泡の二相流挙動評価実験は図 5-1 に示す試験水槽やエアロゾル発生器，ワイヤメッシュセンサ等を用いて行った．図 5-2 には二相流実験装置の系統図を示す．



図 5-1 二相流実験装置外観

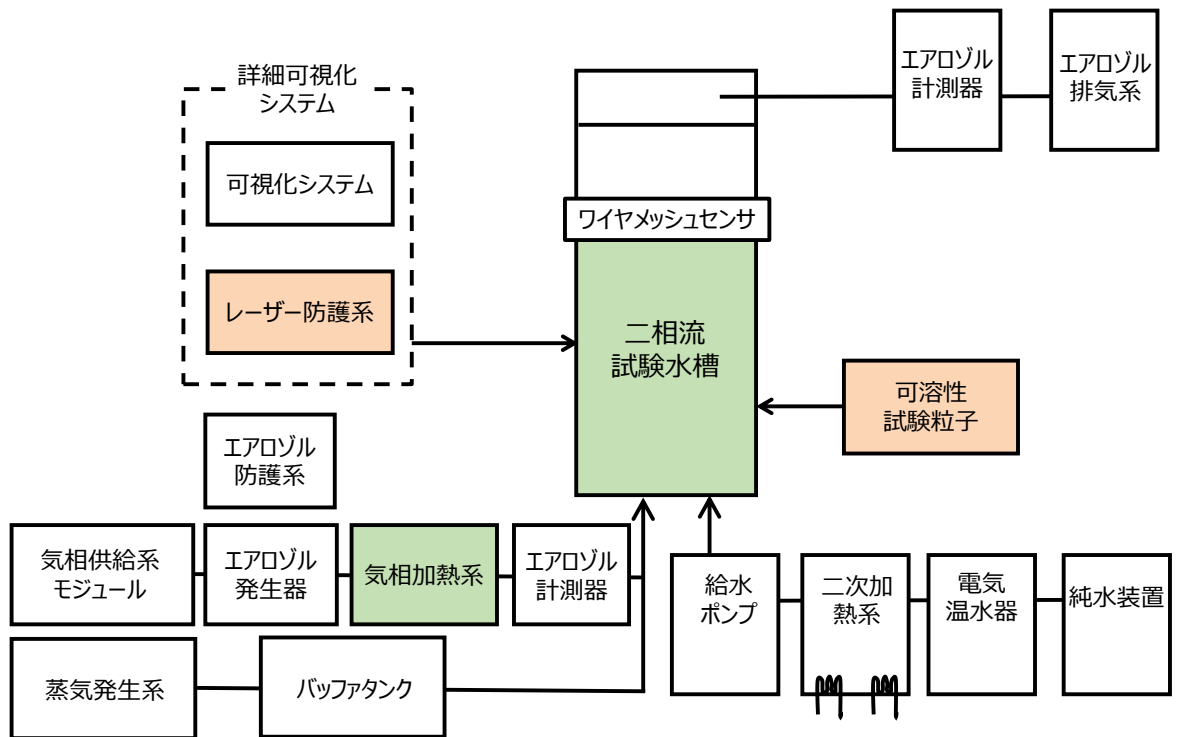


図 5-2 二相流実験系統図

5.3.2. 本年度行った二相流実験装置の改造

本年度は新たに気体加熱器 (CLH-0.6, 新熱工業製) を導入した。蒸気と空気を混合させる際に蒸気が凝縮することを防ぐことが目的である。昨年度まで常温の空気を使用していたが気体加熱器により 100°C前後の空気を供給可能となった。

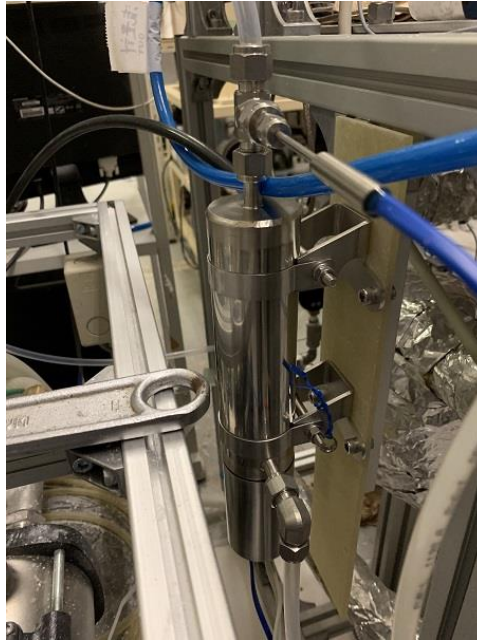


図 5-3 新たに新設した気体加熱器

5.3.3. ワイヤメッシュセンサ

二相流流動挙動を計測する手法として本実験では図 5-4 に示すワイヤメッシュセンサ (Wire Mesh Sensor : WMS) を使用する。WMS の概念図を図 5-5 に示す。WMS は液相と気相の導電率の違いからボイド率 (気相が占める体積割合) を計測するセンサである。プローブ式センサでは局所的な計測となるのに対して、WMS は試験流路断面全体を同時に計測することが可能であるというメリットがある。詳細な計測原理については後述する。水槽 1 と水槽 2 に挟み込まれる形で WMS は取り付けられている。WMS は流路内にワイヤを張る侵襲型のセンサである。WMS のワイヤの流路断面への侵襲性については、金井ら^[47]により十分に小さく、ワイヤ通過による気泡変形の影響は小さいことが確認されている。本実験で使用した WMS は直径 0.3 mm のワイヤを 7.81 mm 間隔で平行に張ったワイヤ層を直行させた 2 層をさらに重ねた 4 層構造となっている。ワイヤが直行した点が計測点となっている。

センサ部仕様

1. 64 チャンネルのダブルワイヤメッシュセンサである、500×500 mm の流路寸法をもつこと。
2. トランスデューサ電極 64 本×1 層に対し、レシーバ電極 64 本×2 層で挟み込む構成のダブルワイヤメッシュセンサであること。
3. ワイヤ径は 0.3 mm であり、同一層上のワイヤ間隔は 7.8 mm であること。
4. トランスミッタ電極層およびレシーバ電極層の間隔は 2.0 mm であること。
5. センサは、実験装置に取り付け容易な形状と寸法であること。
6. センサは、実験に使用する水槽に漏れがない状態で接続できる構造であること。
7. 重量はセンサ部分のみで 50 kg 以下であること。

8. 運転時の最大圧力 1.5 bar, 最大温度 373 K において計測可能なこと.
9. 水-空気または水-蒸気二相流動中において, 気相速度 2 m/s 以下の計測が可能であること.
10. 計測においては, 導電率 0.5~1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 粘性係数 1 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ の水中において計測可能なこと.

コントローラー部仕様

1. ダブルワイヤメッシュセンサ, 64 チャンネル対応 (合計 128 チャンネル) であること.
2. 最高サンプリング周波数は 1,000 Hz 以上であること.
3. メモリ容量は 8GB 以上であること.
4. トリガー操作が可能であること.

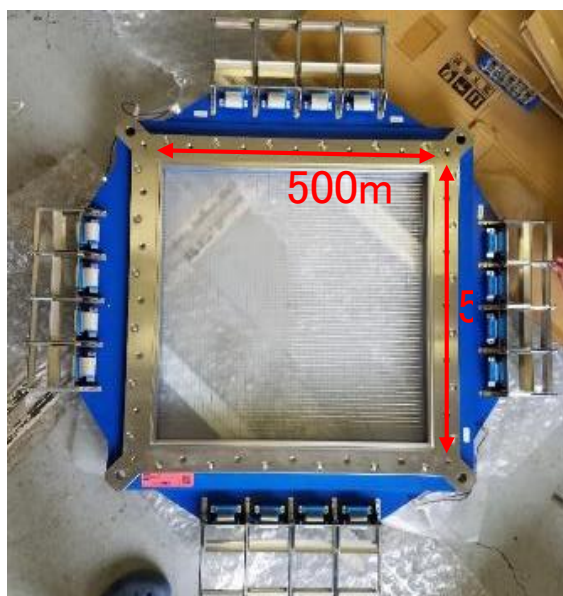
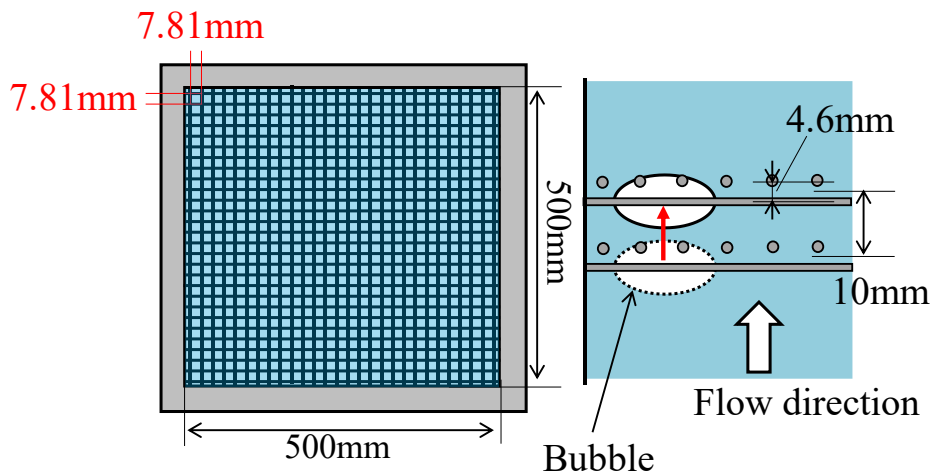


図 5-4 ワイヤメッシュセンサ



Measuring points: 64×64
 Spatial Resolution: $7.81 \times 7.81\text{mm}$
 Wire diameter: 0.3mm

(a) Top View

(b) Horizontal View

図 5-5 WMS の概念図

気液二相流流動挙動を把握する上で重要な特性量であるボイド率を WMS センサにより計測する。ワイヤ間に交流の定電圧を掛けることでワイヤ間に存在する気相と液相の導電率の差を用いて断面ボイド率分布を高空間分解能かつ高速時間分解能でリアルタイム計測が可能である。

水単相での導電率を計測し、その計測値を用いて気液二相流での計測結果を校正することでボイド率を計測することができる。ボイド率の校正式を以下に示す^[18]。

$$\varepsilon = \frac{U_w - U_{meas}}{U_w} = 1 - \frac{U_{meas}}{U_w} \quad (5-1)$$

ここで ε はボイド率、 U_w は水単相での計測信号値、 U_{meas} は二相流中の計測信号値である。水単相での計測値を校正值として使用する。水の導電率は温度や純度などの条件によって異なるため、水単相の計測値は条件が変わる都度、計測し直した。

図 5-5 の Horizontal View に示すように WMS はワイヤが直行した層を重ねた構造となっており、層の間隔は 10mm となっている。あらかじめ層間隔が定まっているので気泡が上流と下流のワイヤ層で計測される時間差から、気相上昇速度を計測する。

5.3.4. エアロゾル計測

プールスクラビングの除染機能を評価するため、実験による DF の評価式を以下に示す。

$$DF = \frac{N_{Ii}}{N_{Oi}} \quad (5-2)$$

N_{Ii} はスクラビング前のエアロゾル総質量濃度であり N_{Oi} はスクラビング後のエアロゾル総質量濃度である。そのため除染係数を評価する上では試験部の入口と出口においてエアロゾルの質量濃度を計測する必要がある。図 5-6 にエアロゾル計測の概念図を示す。エアロゾル発生器から発生させたエアロゾルを気相に混入させ、プール部を通す前と後において二か所、エアロゾル計測を行う。またエアロゾル計測を行う際に計測範囲を超えている場合には希釈器を用いて希釈することとした。

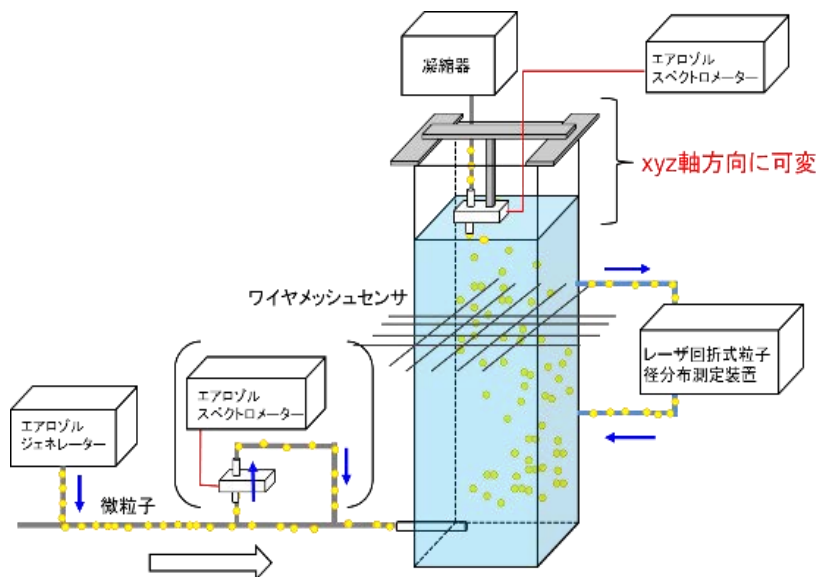


図 5-6 エアロゾル計測の実験体系

エアロゾル計測器はセンサ部を変更することで様々な濃度を計測でき、かつ粒子の種類について、任意の粒子を計測することが可能なエアロゾルスペクトロメーター(WELAS 2070, PALAS)を使用した。また、この機器は既に関連研究で使用された実績がある^[26]。表 5-3にエアロゾルスペクトロメーターの仕様を示す。表 5-3に示されている通り、高温・高圧エアロゾルの研究や幅広い粒子径範囲に加え、センサ部とコントロール部が別構成となっており、コントロール部とセンサ部は光ファイバケーブルで接続されるため、本実験の試験部が3000 mm程度あり、その試験部上部で計測する点においても、適していると言える。エアロゾルスペクトロメーターの計測原理としては、コントローラーにあるキセノンランプから発した白色光を、光ファイバを介し、センサ部へ送る。サンプル通過部においてT字型測定領域を構成することで複数の粒子の同時通過によるエラーや領域の端を通過する粒子の過小評価を防いでいる。既知体積の測定領域があり散乱角90度で、粒子の信号を受け、光ファイバを通りコントロール部へ戻す。ここで散乱光のパルス波高で粒径、パルス数から粒子数が解析する。計測原理の概念図を図 5-7に示す。

表 5-3 エアロゾルスペクトロメーター仕様

モデル	2000/3000
粒径範囲	0.2~105 μm センサーによって異なります*
個数濃度	コインシデンス補正により 最大10 ⁶ 個/cc センサーによって異なります*
分解能	256チャンネル(生データにて)
コインシデンス検出	可能
吸引量	5 L/min
白色光源	キセノンランプ 35W
光源寿命	約2000時間
インターフェイス	USB
時間分解能	10 msec
作動条件	-90~70 °C (オプション: T±250°C, p±10bar)
コントローラー寸法・重量	480×200×435 mm (W×H×D)・18 kg
センサー寸法・重量	250×50×100 mm (W×H×D)・2.8 kg
電源	115V/230V, 50/60Hz

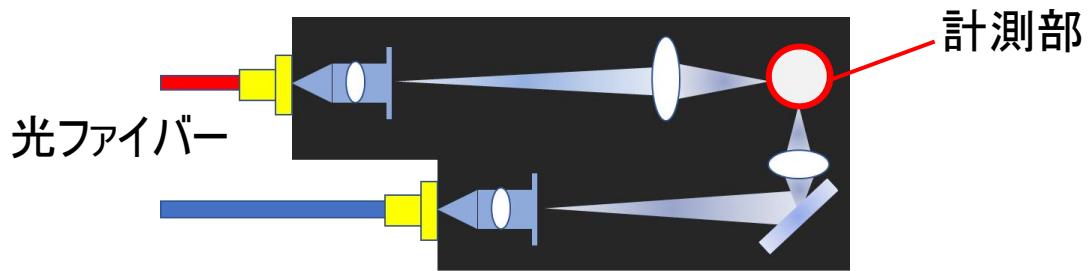


図 5-7 エアロゾル計測原理_概念図

エアロゾル粒子の濃度検討として図 5-8に示すように系統図に番号付けを行い予備計算した。各点で次の関係式が成り立つとする

$$\dot{N}_{particle} = (Q_G + Q_{particle})N_{particle} \quad (5-3)$$

$$Q_{particle} = \dot{N}_{particle} \cdot \frac{\pi}{6} d_{particle}^3 \quad (5-4)$$

ピストン断面積を A_{piston} , エアロゾル粒径を $d_{particle}$, 除染係数を DF, エアロゾルの個数濃度を $N_{particle}$, エアロゾルの個数を $\dot{N}_{particle}$, 気相体積流量を Q_G , ピストン速度を v_{piston} , エアロゾルの充填効率を η として, エアロゾルの発生量は次式により定まる:

$$Q_{particle} = \eta Q_{piston} \quad (5-5)$$

$$Q_{\text{piston}} = A_{\text{piston}} v_{\text{piston}} \quad (5-6)$$

発生器①と計測器⑧での個数濃度は既知の値を用いて次式で求まる

$$N_{\text{particle 1}} = \frac{\dot{N}_{\text{particle 1}}}{Q_{G1} + Q_{\text{particle 1}}} = \frac{1}{\frac{\pi}{6} d_{\text{particle}}^3 \left(\frac{Q_G}{\eta A_{\text{piston}} v_{\text{piston}}} + 1 \right)} \quad [\text{p/cc}] \quad (5-7)$$

$$\begin{aligned} N_{\text{particle 8}} &= \frac{\dot{N}_{\text{particle 8}}}{Q_{G1} + Q_{\text{particle 8}}} \\ &= \frac{1}{\frac{\pi}{6} d_{\text{particle}}^3 \left(\frac{DF}{\eta A_{\text{piston}} v_{\text{piston}}} \frac{Q_{G6} + Q_{G7}}{Q_{G6}} (Q_{G1} + Q_{G2}) + 1 \right)} \quad [\text{p/cc}] \end{aligned} \quad (5-8)$$

エアロゾル粒径 $d_p = 0.45 \mu\text{m}$ の場合 (例: 硫酸バリウム) であれば $4.2 \times 10^3 \sim \leq N_{\text{particle 8}} \leq 3.5 \times 10^9 \text{ p/cc}$, エアロゾル粒径 $d_p = 10 \mu\text{m}$ の場合 (例: エクспанセル粒子) $3.8 \times 10^{-1} \sim \leq N_{\text{particle 8}} \leq 3.2 \times 10^5 \text{ p/cc}$ になり, 発生濃度の調整により計測器の範囲内で計測可能であることが確認された. 様々な粒子を使用するため図 5-9 に示すような濃度範囲のセンサを使用することとした.

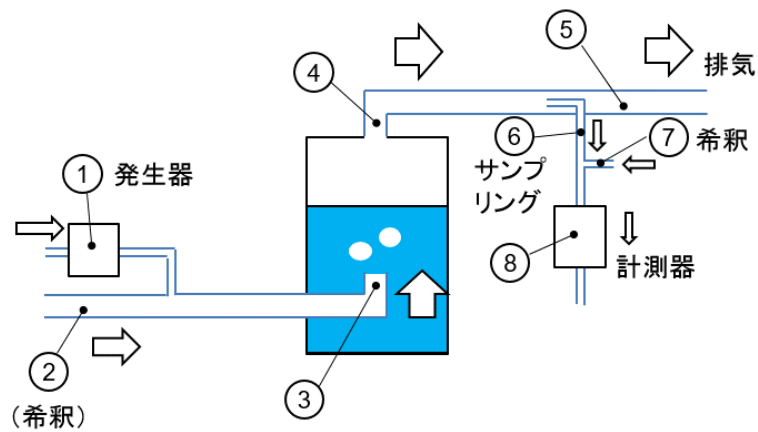


図 5-8 濃度を概算するための計算体系

計測可能範囲(5種類の組み換え)

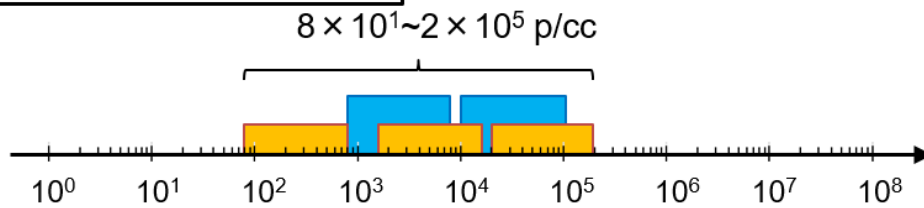


図 5-9 エアロゾル濃度範囲

エアロゾル発生器の検討としては、関連研究で用いられていたことと、様々な濃度に変更でき、かつ粒子の種類も任意の粒子を用いることが可能な乾燥分散型エアロゾルジェネレーター(RBG 2000, PALAS)を用いることとした。発生機構の原理としては、シリンダー内にある圧縮粉末の円柱はピストンにて、一定のスピードで押し上げられ、円柱の先端において回転ブラシにより一定の率で削り取られ、圧送エアにて分散することによりエアロゾル発生させる。ピストン径やピストンスピードは可変であり、この方法により任意の濃度を決定できる、また質量発生率 (mg/h) 及び (mg/m³) を算出する事が可能である。

表 5-4 エアロゾルジェネレーター仕様

RBGタイプ	ピストン長 (mm)	ピストン径 (mm)	供給固定容量 (g)	供給スピード (1mm/h)	供給スピード (5mm/h)	供給スピード (700mm/h)
RBG 1000	70	7	3.1	38 mg/h	190 mg/h	27 g/h
		10	6.3	79 mg/h	395 mg/h	55 g/h
		14	12.3	154 mg/h	770 mg/h	100 g/h
		20	25.1	324 mg/h	1620 mg/h	211 g/h
RBG 2000	180	16	30	200 mg/h	1000 mg/h	140 g/h
		32	144	800 mg/h	4000 mg/h	562 g/h

5.3.5. 高速度カメラによる可視化

試験水槽にノズルから噴射された気相噴流を高速度カメラ (Photron 社製, FASTCAM Mini UX100 および FASTCAM Mini AX-200), LED ライト (日進電子製, LTD-530300) を用いて、バックライト法により撮影を行った。図 5-10 に示すようにバックライト法は、光がカメラに垂直に入るように光源を設置しカメラと光源の間に存在する被写体の影を撮影する方法である。本実験では被写体となる上昇気泡の射影画像を取得する。レンズは Nikon 社製 AF・S DX Micro・Nikkor 40 mm f/2.8 G を使用する。また、LED ライト単体では水槽全体を照らすことができず、位置によって輝度の違いが生じる。噴流全体を撮影する際にはこれを防ぐためにトレーシングペーパーを LED ライトと水槽壁面との間に貼り付け、光を拡散させて撮影を行った。

さらに図 5-11 に示すように薄型水槽を用いた PIV による流動場の可視化を行った。トレーサー粒子としては Fluostar を使用した。この可視化装置は噴流内部または気泡内部を可視化すること目的としている。

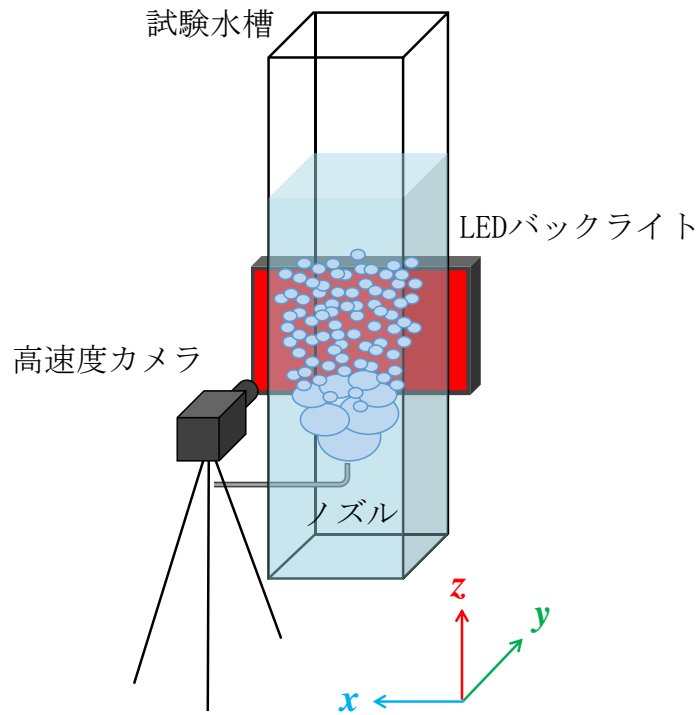


図 5-10 バックライト法による可視化手法

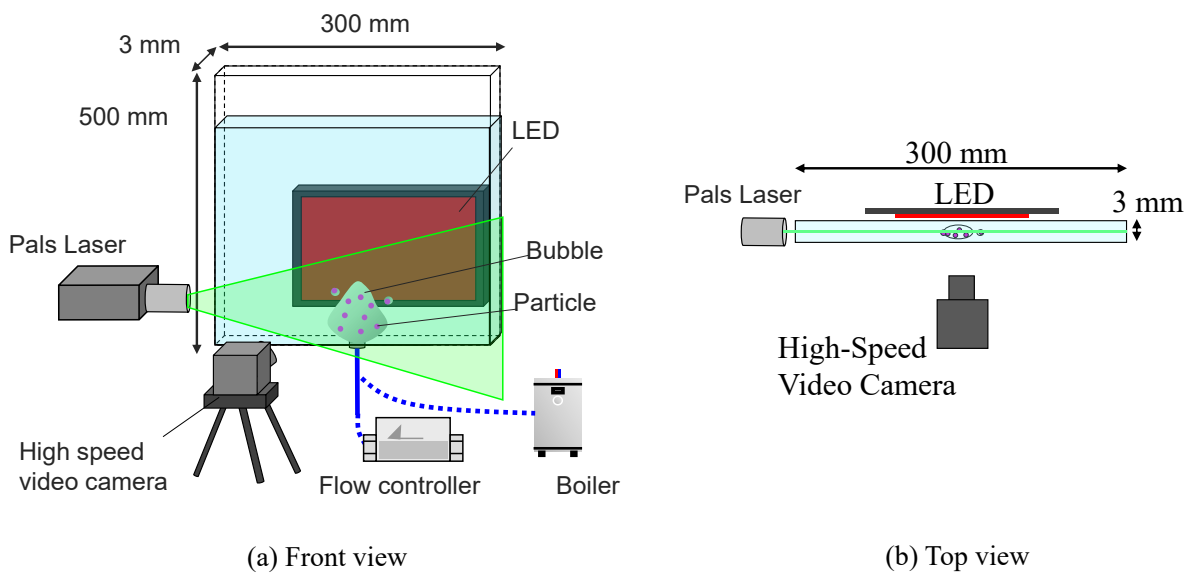


図 5-11 薄型水槽を用いた可視化装置

5.4. エアロゾルを含まない気液二相流実験

5.4.1. エアロゾルを含まない二相流実験について

プールスクラビングによるエアロゾル除去現象は気液二相流と密接な関係があるとされている。MELCOR においてはプールスクラビングによる除染は図 4-3 に示すような二相流モデルの下で行われると考えられており、除染係数もまた二相流モデルのもとで計算されている。よって二相流挙動を把握し、流動モデルの妥当性を検証する必要がある。ここではエアロゾルを用いずに純粋な気液二相流挙動の計測を行い、モデルの妥当性検証に資するデータの取得を目指す。

実験では空気流量、蒸気流量、サブクール度（飽和蒸気温度と水温との差）、計測高さを変えて計測を行った。

5.4.2. 気相噴流の可視化

まず流動について可視化により定性的な考察を行った。図 5-12 には空気噴流および蒸気-空気混合噴流を可視化した画像を示す。空気のみを噴流ではノズル先端で大気泡が形成され、上昇しながら細かな気泡群へと分裂している。蒸気-空気混合噴流においてもノズル先端で大気泡が形成されて上昇とともに分裂するが、空気のみを噴流に比べて細かな気泡が多く存在するように見える。さらに図 5-13 に示すようにノズル先端を可視化した。ノズル先端では空気噴流に比べて蒸気-空気混合噴流では気泡界面が乱れていることがわかる。これは空気が大気泡を形成すると同時に蒸気が凝縮しているためであると考えられる。このように蒸気凝縮が気相噴流の流動や分裂挙動に影響を及ぼす可能性が考えられる。

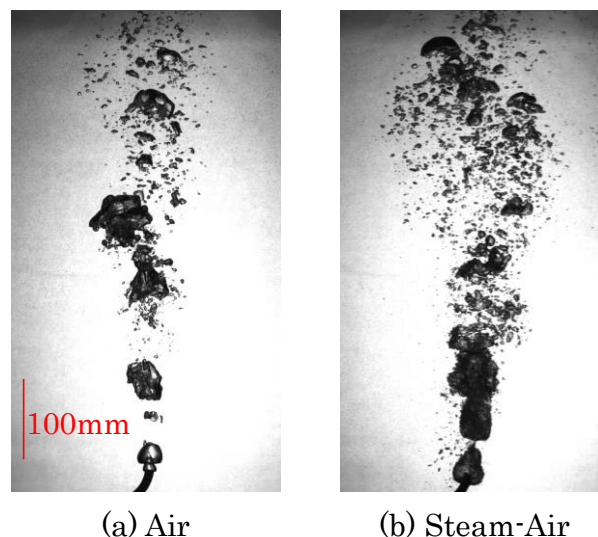


図 5-12 空気噴流（空気流量：10 L/min，水温：約 85°C）および蒸気-空気混合噴流（空気流量：10 L/min，蒸気流量：266 L/min，水温：約 85°C）の可視化画像

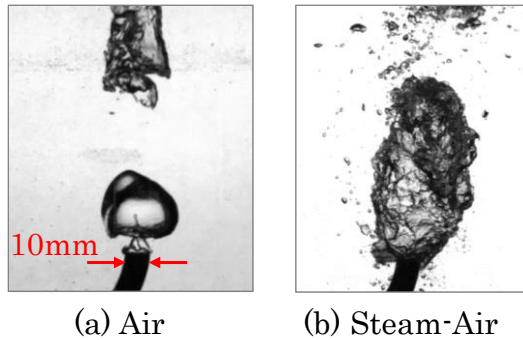


図 5-13 ノズル先端における噴流の可視化画像

5.4.3. 気泡アスペクト比の計測結果の比較

次にノズルから 700 mm 下流の位置で撮影した可視化画像からアスペクト比を計測した。図 5-14 には計測に用いた画像を示す。画像処理ソフト (ImageJ) を用いて気泡形状を 5 点プロットし、楕円近似することでアスペクト比を算出した。なお、画像のピントが合っていない気泡や形状が不明瞭な気泡については無視した。

その結果を図 5-15 に示す。赤色のプロットは空気のみ結果であり、青色のプロットは蒸気-空気混合気の結果である。さらに Okawa ら^[11]や Wellek ら^[20]の単一気泡のアスペクト比に関する相関式および MELCOR[®]における二相流中の気泡に関するアスペクト比の相関式と比較を行った。まず、空気のみ噴流のアスペクト比と混合噴流のアスペクト比との間に有意な差は確認されなかった。相関式との比較では MELCOR の相関±50%以内に実験結果の大半が集中している。また Okawa らや Wellek らの相関式の間の一部の実験結果が分布していることがわかる。可視化画像によるアスペクト比計測では蒸気凝縮がアスペクト比に代表される気泡形状に影響を与えることは確認されなかった。

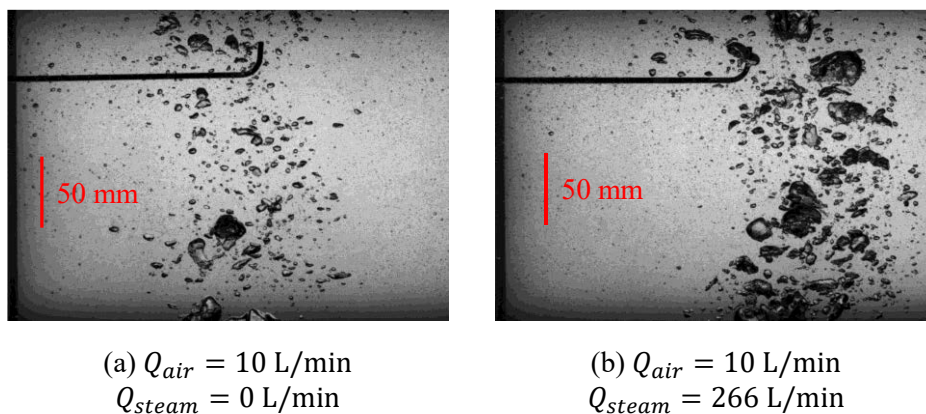


図 5-14 アスペクト比計測に用いた可視化画像

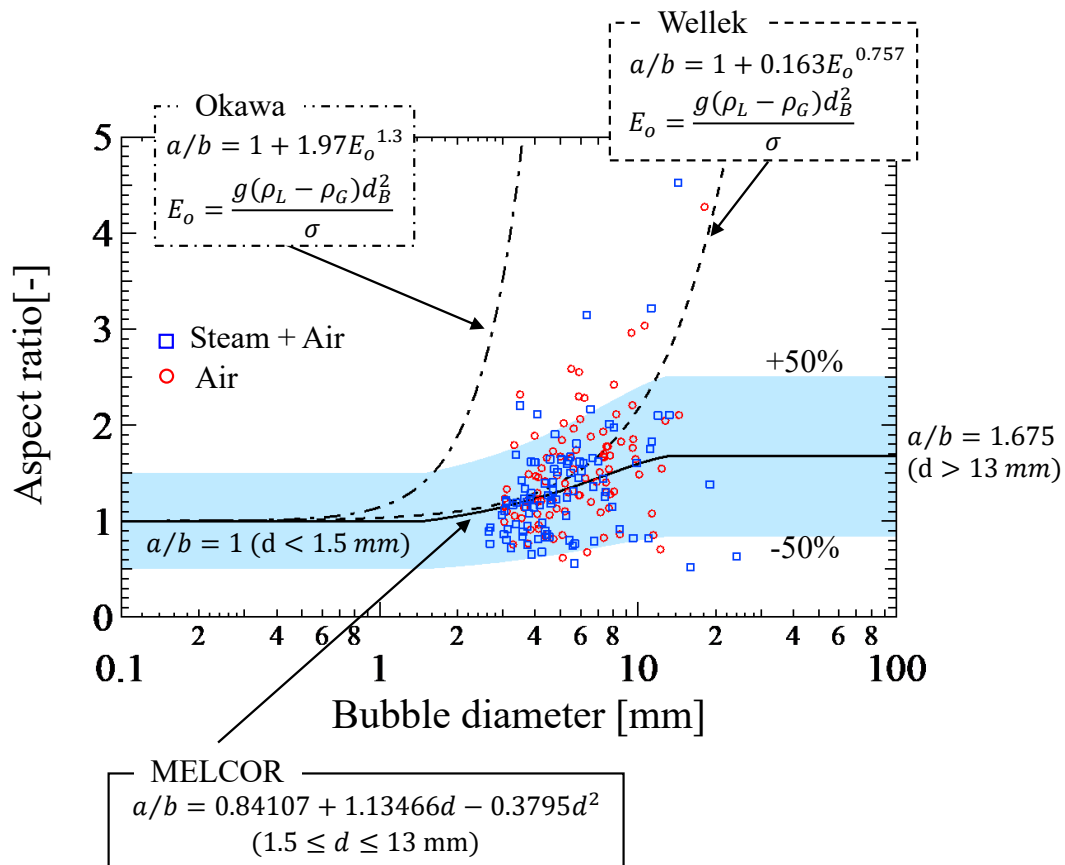
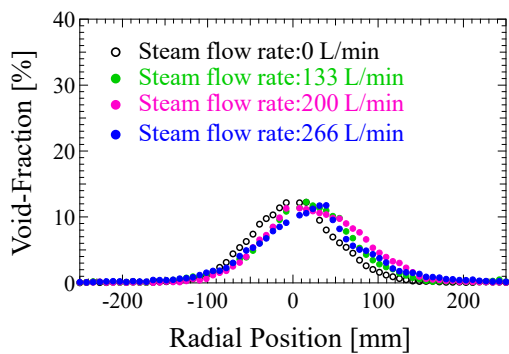


図 5-15 画像から算出したアスペクト比の比較結果

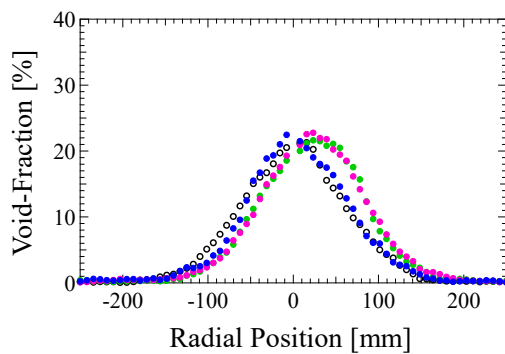
5.4.4. ワイヤメッシュセンサによるボイド率および気相速度の計測

WMS を用いて計測した結果について議論する. 計測結果の一例として図 5-16 にはノズルから 300, 700 mm 下流において空気流量 50 L/min に対して蒸気流量 0, 133, 200, 266 L/min で混合した噴流を計測した結果を示す. どの結果も蒸気混合の有無によらず同程度のボイド率分布を示していることから, すでに蒸気は凝縮していることが考えられる. ノズルに近い $z = 300$ mm に比べて $z = 700$ mm ではボイド率が低下している. 噴流が上昇するにつれて半径方向に散開したためである. またサブクール度が低い条件の方が高い条件に比べてボイド率が高い. これは高温水中において空気が加熱され膨張した可能性や, 水の粘性係数の低下による気液界面におけるせん断力の減少が考えられる.

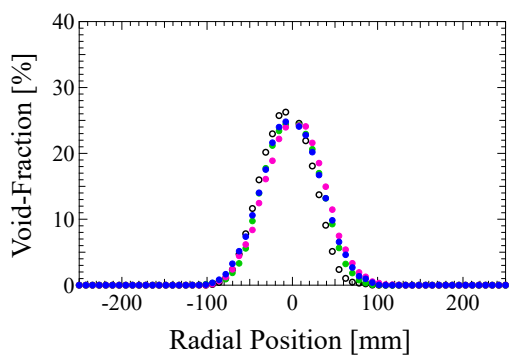
図 5-17 に気相速度の計測結果を示す. ボイド率に対応するような傾向を示している. 気相速度が浮力つまりボイド率の高さに依存しているからであると考えられる. 蒸気がすでに凝縮している場合, 気相速度の水温への依存性は確認されたが蒸気の混合の有無や流量への依存性は確認されなかった.



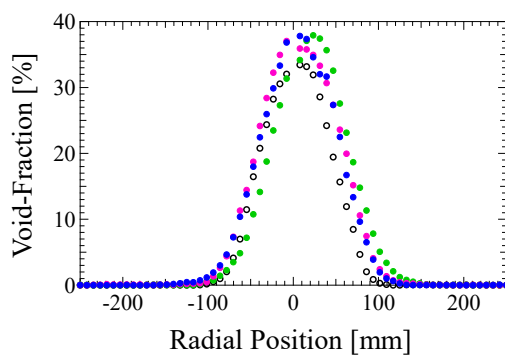
(a) $z = 700 \Delta T_{sub} = 15 \sim 20 \text{ K}$



(b) $z = 700 \Delta T_{sub} = 2 \sim 5 \text{ K}$



(c) $z = 300 \Delta T_{sub} = 15 \sim 20 \text{ K}$



(d) $z = 300 \Delta T_{sub} = 2 \sim 5 \text{ K}$

図 5-16 $z=300, 700 \text{ mm}$ における平均ボイド率分布

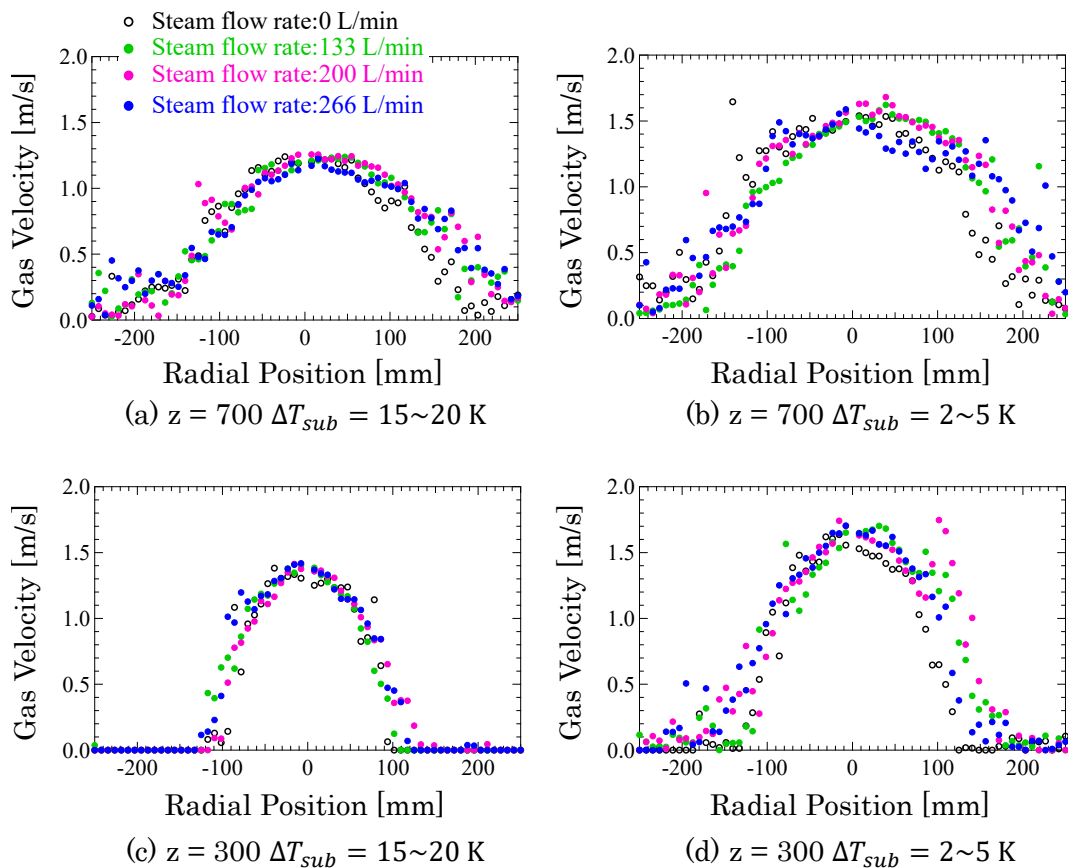


図 5-17 $z = 300, 700$ mm における平均気相速度分布

5.4.5. 気泡径分布計測結果の比較

ここでは WMS で計測された気泡径計測の結果を図 5-18 および図 5-19 に示す。サブクール度が高い条件と低い条件でそれぞれ流量条件を変えながら実験を行った。蒸気流量の増加に伴って計測される気泡数が増加している。なお計測は 30 秒間行った。また個数平均 (Mean Number Diameter) はわずかに減少する傾向がみられた。さらに体積加重した体積平均径 (Mean Volumetric diameter) は蒸気流量の増加に伴って明らかに減少している。体積平均径は空気流量が同条件であってもサブクール度が低い条件の方が大きくなっている。5.4.4 項で示したとおりサブクール度が低い条件 (水温が高い条件) では気相速度が速く、気泡が十分に分裂することなく上昇している可能性がある。

体積平均径をまとめたものを図 5-20 に示す。どの条件でも蒸気流量の増加に伴って平均気泡径が減少している。しかし、平均気泡径は図 5-18 および図 5-19 に示すような気泡径分布のモード径やメジアン径とは明らかに乖離しており、この結果を用いた評価では実現象を適切に評価できない可能性がある。

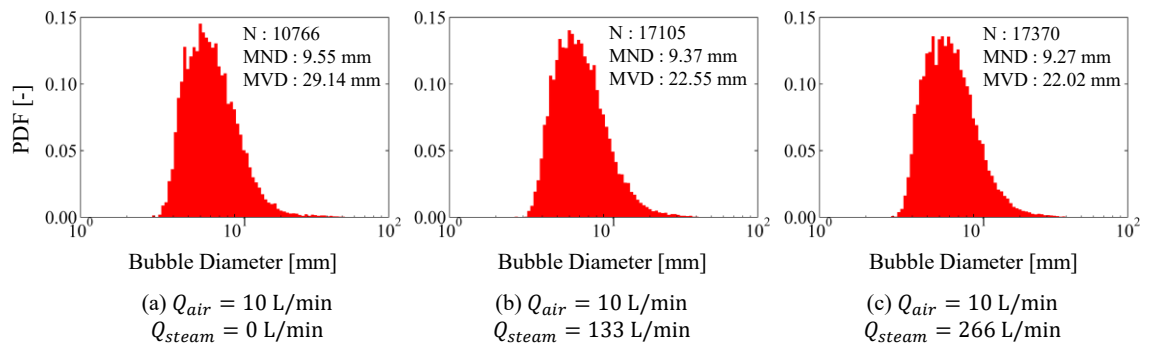


図 5-18 サブクール度 15–20 K で計測した気泡径分布

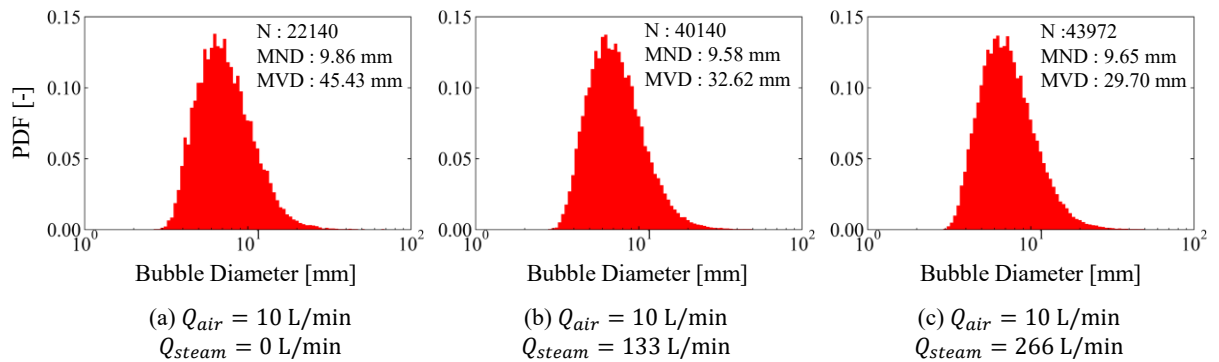


図 5-19 サブクール度 2–5 K で計測した気泡径分布

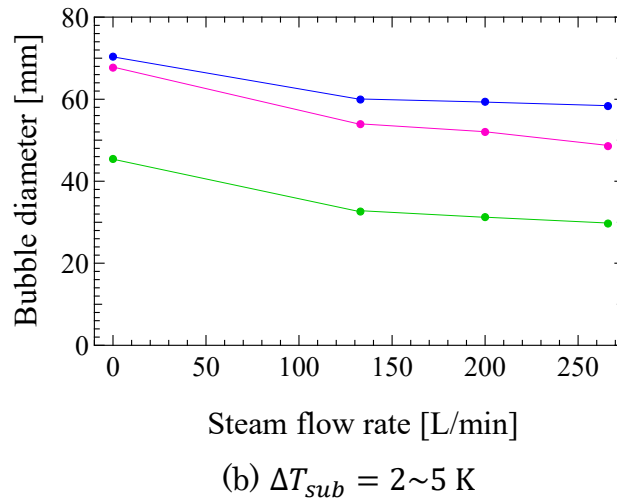
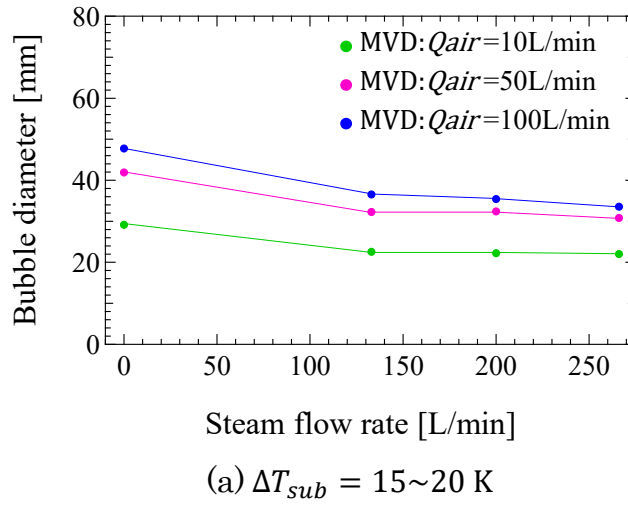


図 5-20 気泡体積平均径の推移

5.4.6. 気泡径分布データに対する評価方法の検討

5.4.5 項で述べたとおり，気泡径データを適切に評価する方法を検討する必要がある．まず，図 5-21 に示すように気泡径分布を個数頻度ではなく体積割合に変更した．図 5-21 (a)を見ると 7 mm 前後でピークがみられるだけでなく，20 mm を超える比較的大きな気泡が分布していることがわかる．ここで計測された大気泡は扁平楕円形状ではなく，図 5-22 において破線で囲まれたような流動的な変形を伴う気泡である．蒸気を混合することで図 5-21 (b)，(c)に示すように大気泡の割合が減少し，小気泡の割合が増加している．

スウォーム上昇領域ではプールスクラビング効果による除染は主に微細化した気泡において機能すると考えられており，逆に前述の大気泡は大量のエアゾルを搬送する可能性がある．そこで小気泡と大気泡を計測されたデータから識別し，それぞれ評価を行うことで従来からの評価に比べてより詳細な分析が可能となると考えられる．そこで本研究では混合ガウスモデル (Gaussian Mixture Model:GMM) を用いた気泡径データのクラスタリングを導入する．混合ガウスモデルとは式(5-9)の形式で表される複数の加重された正規分布の確率密度関数である^[21]．

$$p(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^K \pi_k \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^m \sqrt{|\Sigma_k|}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_k)^T \boldsymbol{\Sigma}_k^{-1} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_k)\right\} \quad (5-9)$$

ここでは機械学習を用いた混合ガウスモデルによるクラスタリング処理について述べる。図 5-17 および図 5-18 のような通常の気泡径データから図 5-21 に示すような体積加重した気泡径データを作成し、対数をとることで図 5-23 (a) のような気泡径データを作成する。この気泡径データに対して混合ガウスモデルによるフィッティング処理を行う。その結果図 5-23 (b) のように 2 成分にクラスタリングされる。それぞれの成分ごとに平均径を算出して評価を行う。

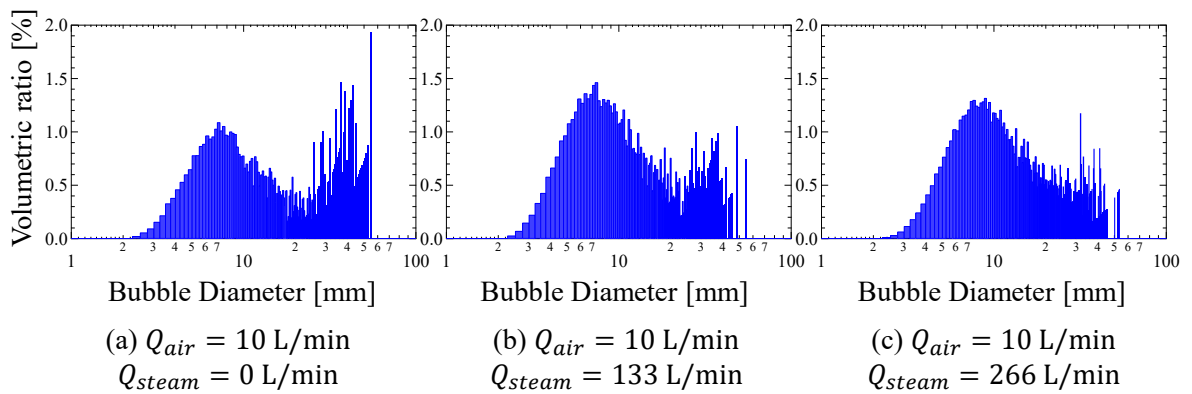


図 5-21 サブクール度 15–20 K 条件における体積加重気泡径分布

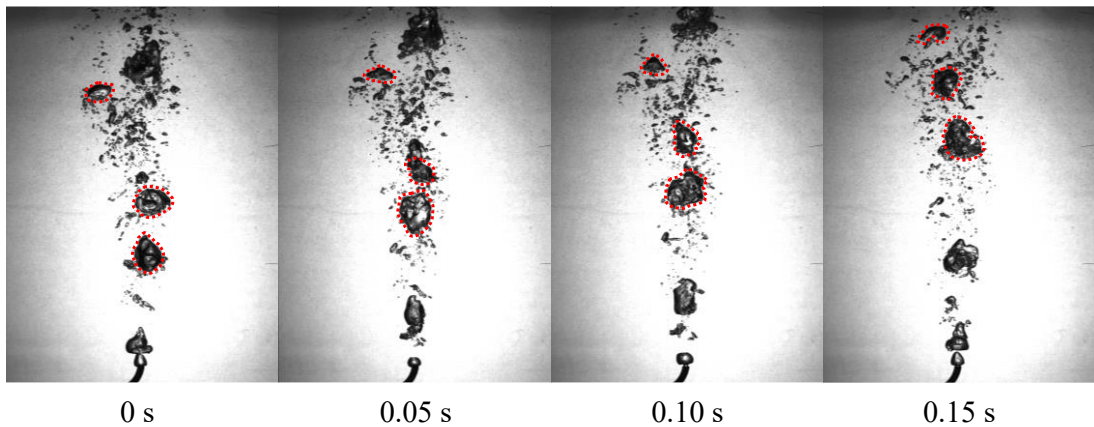


図 5-22 噴流中に微細化せずに残留する気泡の可視化

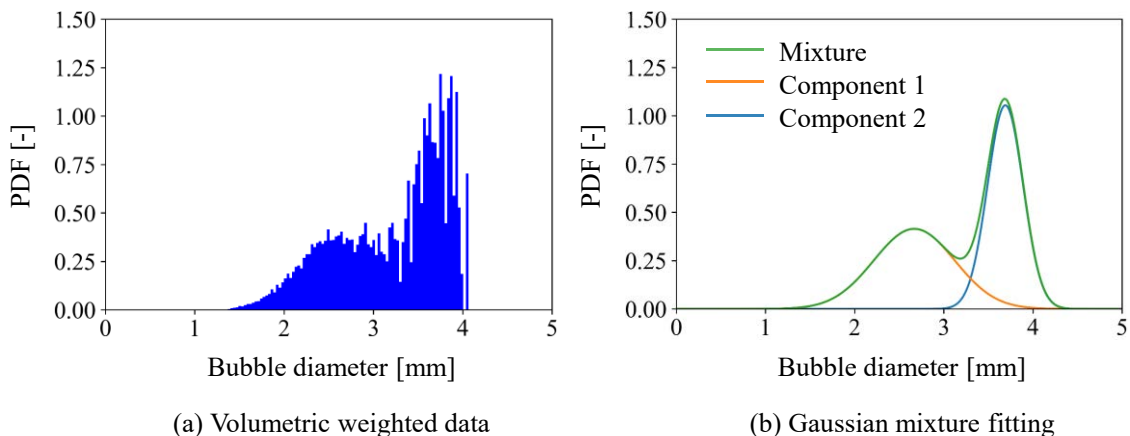


図 5-23 混合ガウスモデルによるフィッティング処理結果

5.4.7. 気泡径分布評価結果

図 5-24, 図 5-25 には混合ガウスモデルによってクラスタリングを行った結果を示す。様々な分布形状の気泡径データがフィッティングできていることがわかる。このようにクラスタリングしたデータから成分ごとに体積平均径を算出した。小気泡成分と大気泡成分のそれぞれの体積平均径が蒸気流量の増加に伴って変化する推移を比較した結果を図 5-26, 図 5-27 に示す。空気流量を一定にした条件 (図 5-26) では、小気泡成分および大気泡成分ともにサブクール度が低い方が平均径は小さく推移する。平均径の減少量は大気泡成分の方が小気泡成分よりも大きい。また、サブクール度を一定にした条件 (図 5-27) では小気泡成分および大気泡成分ともに空気流量が低い方が平均径は小さく推移する。このように平均気泡径は低サブクール度・高空気流量条件において大きくなる傾向が確認された。

さらに蒸気流量の増加に伴う平均径の減少率を比較した。蒸気流量が 0 L/min の時に計測された平均径を基準にして、蒸気を混合した場合の気泡径の減少率を図 5-28, 図 5-29 に示す。平均径が大きくなる条件 (低サブクール度・高空気流量) では小気泡成分と大気泡成分ともに蒸気流量の増加に伴って増加している。一方、平均径が小さくなる条件 (高サブクール度・低空気流量) では減少率は上昇しなかった。低サブクール度条件では蒸気凝縮挙動が比較的穏やかになり噴流分裂への影響が小さくなると考えられる。さらに高空気流量では噴流に占める蒸気の割合が低くなり結果的に蒸気凝縮の影響が噴流分裂に対して現れにくくなると考えられる。小気泡成分と大気泡成分との間で減少率を比較すると、すべての条件において大気泡成分の方が大きく推移している。このことから小気泡成分に比べて大気泡成分の方が凝縮による影響を受け易いと考えられる。蒸気凝縮がプールスクラビングによる除染効果を向上させる要因の一つが微細化していない大気泡の分裂を促進するためである可能性が示唆された。

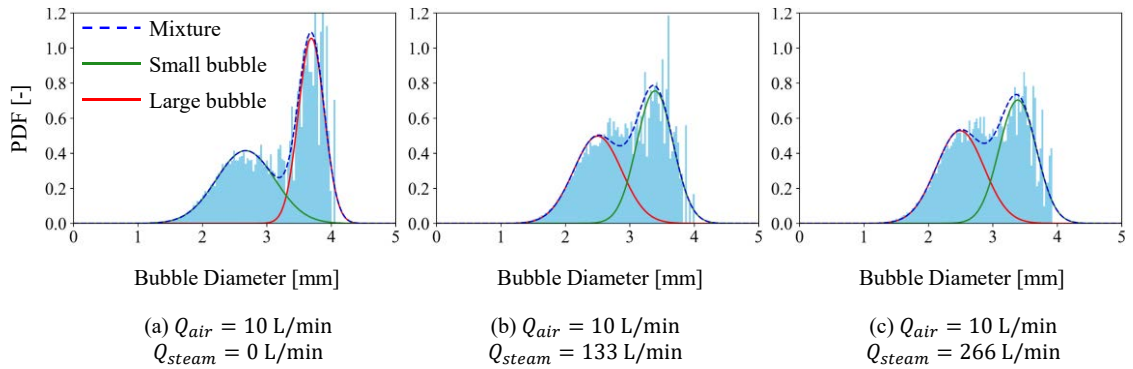


図 5-24 サブクール度 15-20 K 条件における気泡径データに対するフィッティング結果

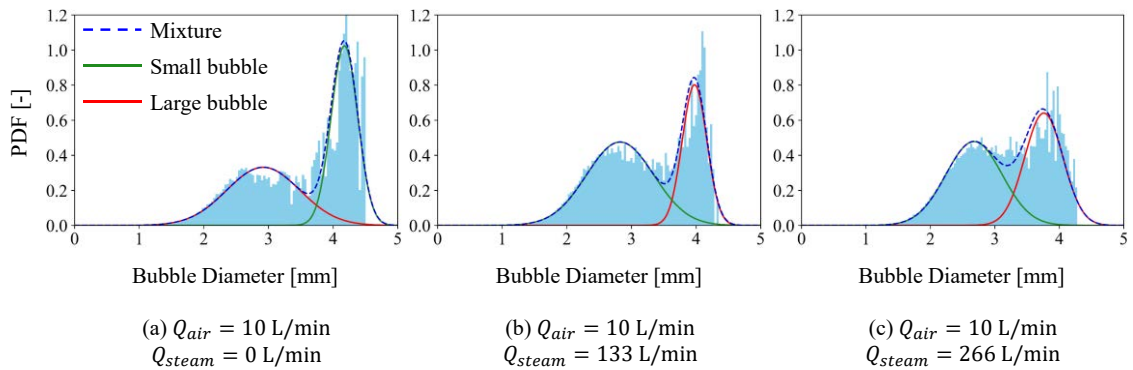


図 5-25 サブクール度 2-5 K 条件における気泡径データに対するフィッティング結果

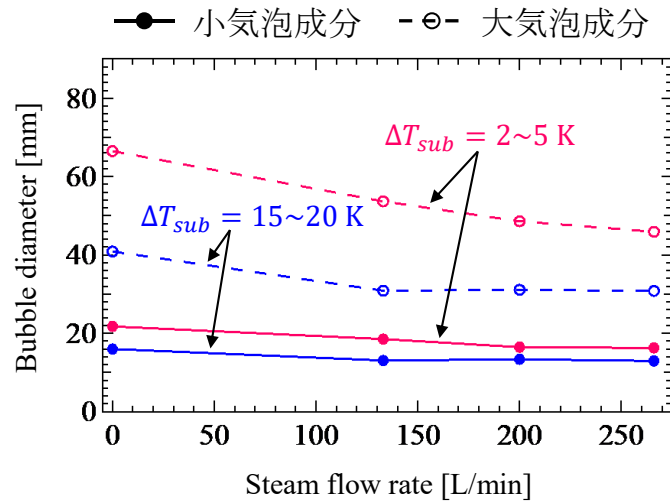


図 5-26 空気流量 $Q_{air}=10$ L/min で一定の条件における体積平均径の変化

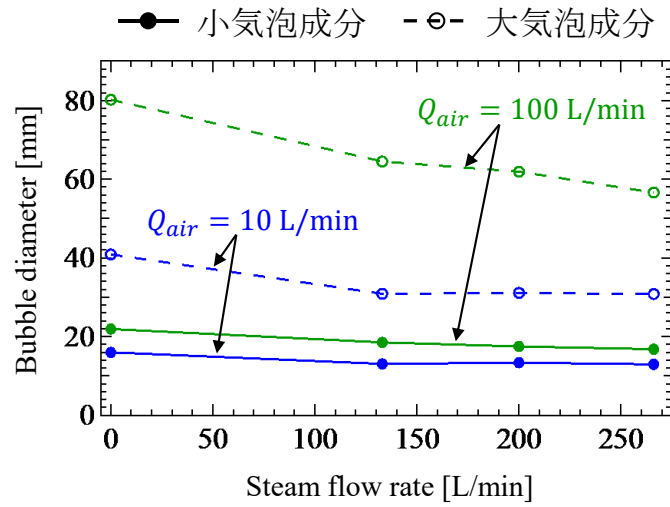


図 5-27 サブクール度 15–20 K で一定の条件における体積平均径の変化

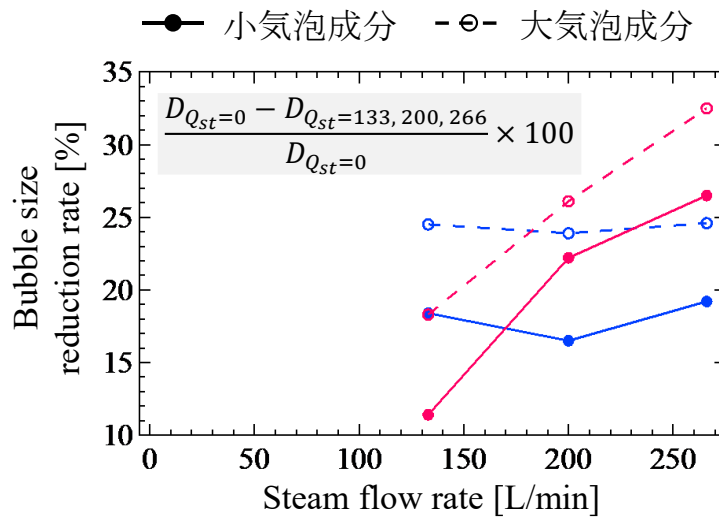


図 5-28 空気流量 $Q_{air} = 10 \text{ L/min}$ で一定の条件における蒸気流量増加に伴う体積平均径の減少率の比較

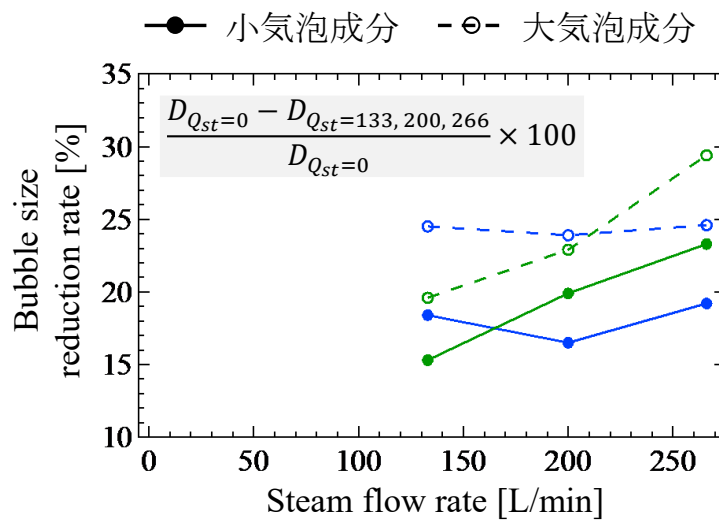


図 5-29 サブクール度 15–20 K で一定の条件における蒸気流量増加に伴う体積平均径の減少率の比較

5.4.8. 気泡径に関する MELCOR との比較

本章ではエアロゾルを含まない条件で計測した結果を MELCOR の流動モデルと比較する。モデルではスウォーム上昇領域における気泡径 d_{swarm} は各条件で一定とされており、蒸気や非凝縮性ガスから成る流入ガスに占める非凝縮性ガスのモル分率 X_{nc} をパラメータとして式(5-10)で表される。

$$d_{swarm} = 7 \times 10^{-0.2265 + (0.0203 + 0.0313X_{nc})^{1/2}} \quad (5-10)$$

この相関式と実験結果を比較するために、蒸気流量 0 L/min で計測した体積平均径を d_{mean} とし式(5-11)のように相関式に代入する。

$$d_{swarm} = d_{mean} \times 10^{-0.2265 + (0.0203 + 0.0313X_{nc})^{1/2}} \quad (5-11)$$

この相関式から算出される気泡径と蒸気を混合して実験した際に計測された平均径とを比較する。その結果を図 5-30、図 5-31 に示す。小気泡成分については平均径が相関式と一致する傾向が確認できる。一方で大気泡成分については、一致しない条件も存在する。この相関式はスウォーム上昇領域における 7 mm 前後の小気泡に対して適応される相関式であるため、大気泡成分については一致しないと考えられる。小気泡成分については実験結果と相関式が一致しており実現象をとらえている可能性がある。しかし、実際には小気泡成分の中でも気泡径は幅広く分布しており、一定の気泡径でモデル化する手法の妥当性を確認する必要性が残されている。

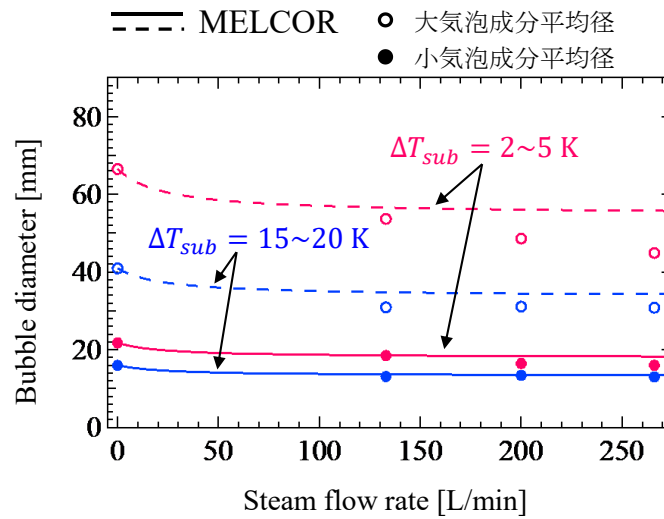


図 5-30 空気流量 $Q_{air} = 10$ L/min で一定の条件における体積平均径と MELCOR の相関式との比較

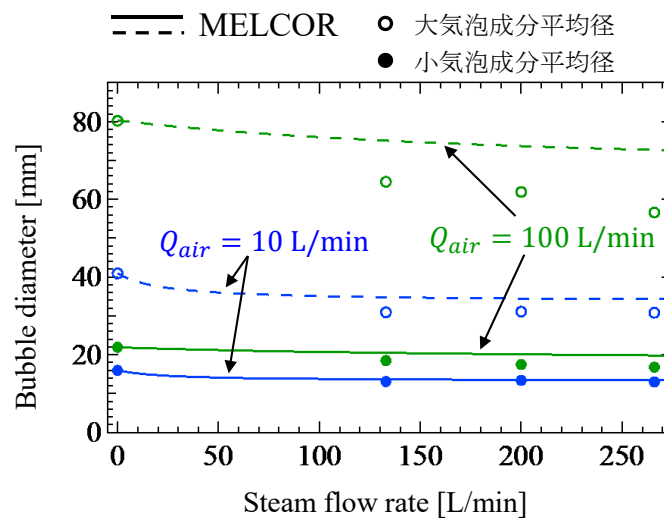


図 5-31 サブクール度 15-20 K で一定の条件における体積平均径と MELCOR の相関式との比較

5.4.9. 温度成層化実験

事故時には高温ガスがサプレッションプールに放出されることでプール水中に温度成層が形成される可能性が指摘されている。そこで試験水槽内に蒸気を噴射し、水温の変化を計測した。実験体系を図 5-32 に示す。試験水槽側面から高さ方向に 200 mm 間隔で 5 点に挿入された熱電対により計測を行った。計測結果を図 5-33 に示す。噴射ノズルから上側は蒸気噴射開始とともに温度が上昇し始める。一方で、ノズルから下側は蒸気噴射が開始されてから一定時間経過後に温度上昇し始めた。最終的には試験水槽全体が同程度の温度に達した。今回の実験ではノズル上側での温度成層の形成は確認されなかった。また、ノズルの噴射方向に対する温度変化の依存性があると考えられる。

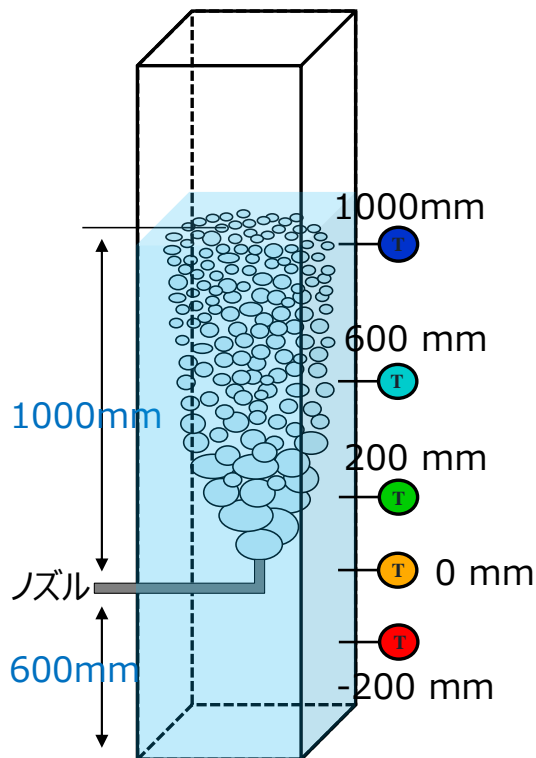


図 5-32 温度成層化に関する温度推移計測体系

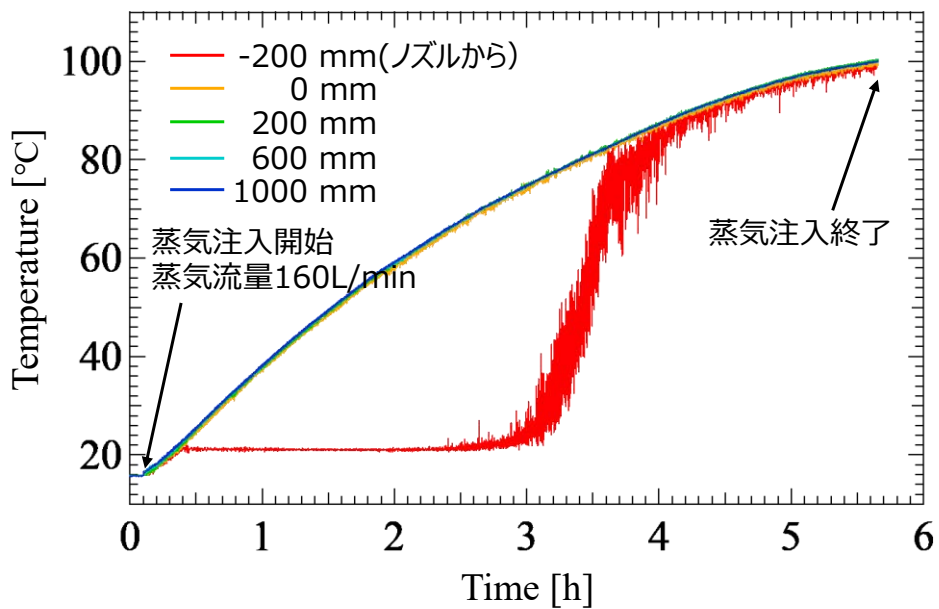


図 5-33 高さ方向の温度計測結果

5.5. エアロゾルを用いた二相流実験

5.5.1. 可溶性粒子使用結果

CsI および CsOH は、原子力発電所の重大事故でエアロゾルとして放出される主要な放射性物質である。しかし、CsI は分散性が悪く本発生機で使用は困難なため、分散性の良い珪藻土粒子を用いた結果を示す。

5.5.2. 粒子性質の流動への影響評価

図 5-34 に時間あたりの入口エアロゾル濃度を示す。可溶性粒子の WMS への影響を考慮し Hyflo supercel を使用した条件では硫酸バリウムを使用した条件に比べ低い濃度でエアロゾル発生させた。硫酸バリウムは分散性が良く、そのため発生させる際に濃度のばらつきが生じることが確認できる。

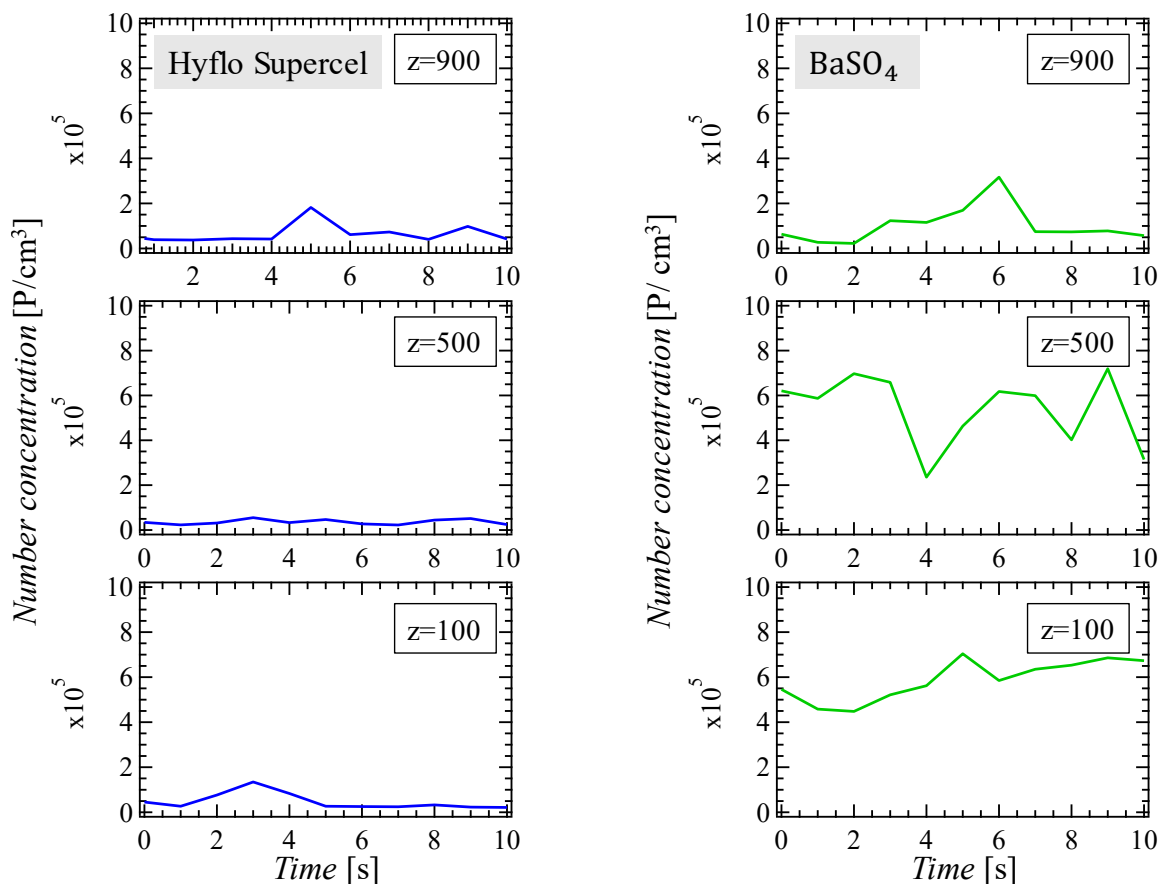


図 5-34 ノズル入口エアロゾル濃度

エアロゾルの性質の影響を調べるために、可溶性の粒子径が代表径 $0.3 \mu\text{m}$ の Hyflo supercel を使用した条件、不溶性の代表径が $0.4 \mu\text{m}$ の硫酸バリウムを使用した条件において 10s の時間平均を行った流量 50 L/min 結果を図 5-35 に示す。赤いプロットが空気単相、青いプロットがエアロゾルに可溶性、粒子径が代表径 $0.3 \mu\text{m}$ の Hyflo supercel を用いた条件である。緑のプロッ

トがエアロゾルに不溶性、粒子径が代表径 $0.4 \mu\text{m}$ の硫酸バリウムを用いた条件である。

左のグラフが時間平均ボイド率である。縦軸がボイド率，縦軸がボイド率，横軸は水平方向の距離であり，中心がノズル位置，左右が水槽の壁面である。右のグラフが時間平均気相速度である。縦軸が気相速度，横軸は水平方向の距離である。これらの結果から，エアロゾルに可溶性，不溶性の粒子を用いた条件において，同様の傾向を示し，ボイド率，気相速度はエアロゾル粒子の性質に依存しないことが示唆された。更に，本条件のエアロゾル濃度では可溶性粒子，不溶性粒子問わず，空気単相とエアロゾルを含む固気二相流ではボイド率，気相速度に大きな違いは生じない事が確認できた。MELCOR では，流動は全て空気単相で考えており，エアロゾル粒子の流動への影響は無視している。本実験結果においても，MELCOR と同様にエアロゾル粒子を含む流動構造は空気単相の流動構造と大きな差がないことが示された。また，MELCOR では，壁面の影響を考えていない無限遠として流動を考えている。しかし，本実験体系では，壁面の影響があり，二次流れなどがあると考えられる。今後は，PIV，数値解析を用いた評価を検討する。また，実機においては，二次流れはあると考えられ，実験においても二次流れのある条件で計測を行うことは重要である。

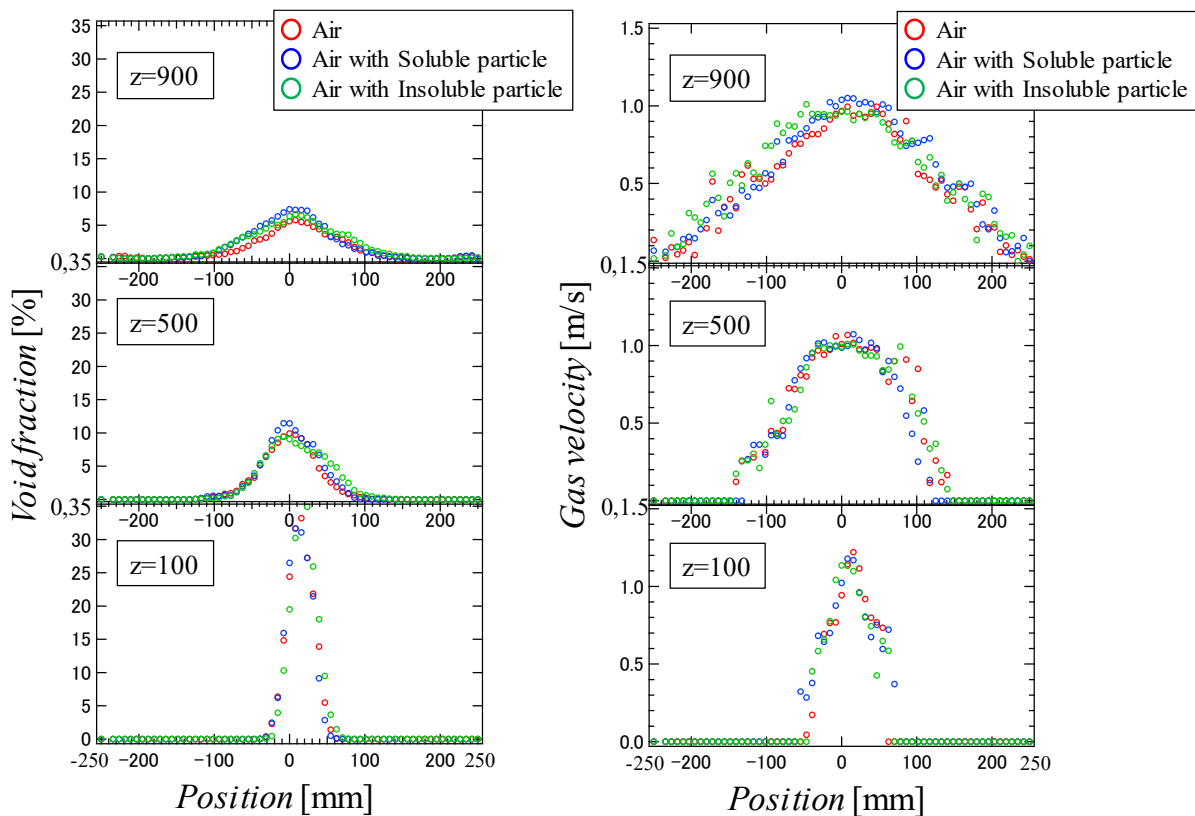


図 5-35 粒子性質の流動構造への影響(50 L/min)

5.5.3. 噴流における平均ボイド率評価

WMS とノズル距離毎の噴流の平均ボイド率を図 5-36 に示す。縦軸は、噴流の平均ボイド率であり、WMS によって算出された値から噴流の幅から算出を行った。横軸は、ノズルから WMS までの距離である。また、ノズルからの距離 500 mm, 900 mm での可溶性エアロゾルを含む条件における噴流の WMS 下部における可視化画像である。100 mm の条件では、ノズルと WMS の距離が近いいため可視化が行えない。結果から、可溶性、不溶性の粒子の有無で数%の差が生じるが、傾向としては同様であり、大きな差がないことが確認できる。また、ノズル近傍の 100 mm の領域において緑色のプロットである不溶性粒子を含んだ条件では他の条件に比べ高い平均ボイド率を示す。その後、下流になるに従い、空気単相の条件、エアロゾルに可溶性、不溶性粒子を用いた条件の差は小さくなることを確認できる。これは、ノズル近傍においては、空気と粒子の密度差がオーダーレベルで生じるため運動量に大きく関わる。エアロゾル粒子に不溶性粒子を用いた条件では、エアロゾルの濃度が高く、その影響ではないかと考える。しかし、現在 MELCOR においては、ボイド率の概念がなく、ノズル近傍のグローブ領域では大気泡のみ、ブレイクアップ後のスウォーム上昇領域では単一の扁平楕円体の集合体として考えられている。そのため、ボイド率を MELCOR と比較を行うことはできないが、エアロゾル粒子の有無、性質によって数パーセントの差が生じることが示唆された。

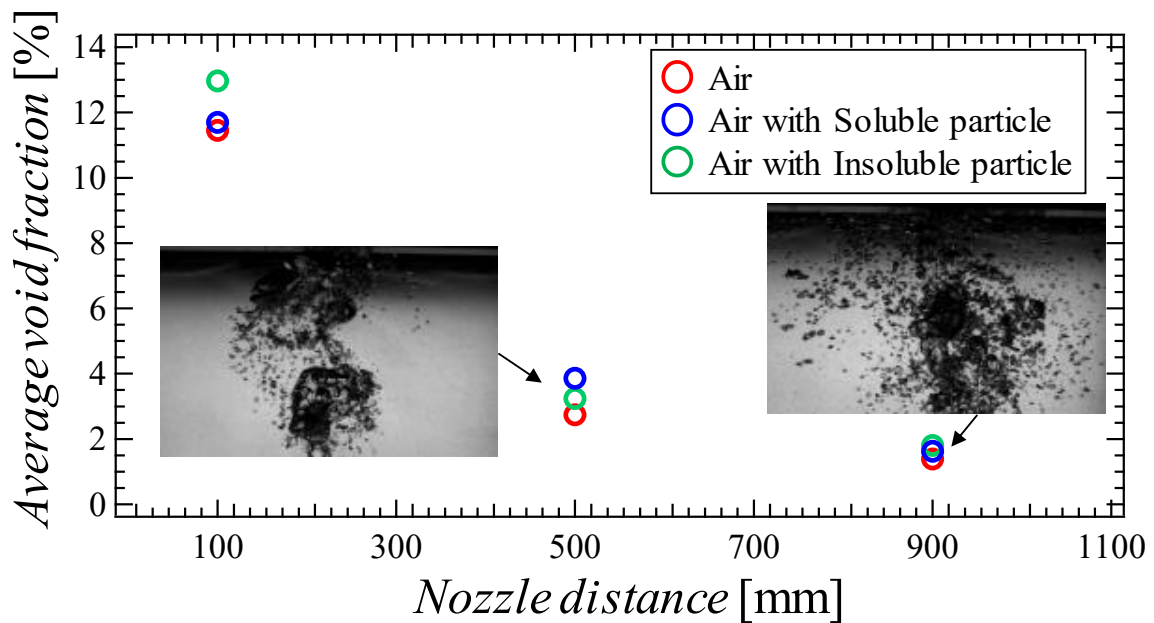


図 5-36 各ノズルからの距離における噴流ボイド率

5.5.4. 噴流における平均気相速度評価

MELCOR においては、スウォーム速度によりプールを通過する時間を算出するため、除染係数(DF)を算出する際に、スウォーム速度の定義は重要である。WMS とノズル距離毎の噴流の平均気相速度の気泡群のスウォーム速度を図 5-37 に示す。縦軸は、スウォーム速度であり、ボイド率と同様に WMS によって算出された値から噴流の幅から算出を行った。横軸は、ノズルから WMS までの距離である。加えて、黒いプロットは下記にて定義されるガス流量、ノズル距離を用いて MELCOR にて定義されるスウォーム速度である^[1]。

$$V_s = \left[\frac{Q_s + 5.33}{3.011 \times 10^{-3}} \right]^{\frac{1}{2}} (1 - 3.975 \times 10^{-4} \times Z) \quad (5-12)$$

ここで、 Q_s はガス流量、 Z はノズルからの距離である。

これらの結果から、空気単相、不溶性、可溶性のエアロゾル粒子を用いた全て条件において、MELCOR によって算出される値と同様の傾向を示すことが確認できた。また、ノズル近傍の領域では MELCOR では過小評価をしていることが示唆されたが、下流の領域においては実験値と良好な一致を確認することができた。これは、この相関式は気泡群のスウォーム上昇領域のものであるが、ノズル近傍では大気泡が支配的であるベント管出口領域であることが理由だと考える。

また、スウォーム速度において空気単相、不溶性、可溶性のエアロゾル粒子を用いた全て条件で差が生じなかったことは、エアロゾル粒子は、ノズルから放出される時や、グローブ領域からスウォーム上昇領域に遷移する際のブレイクアップなどの際に大半が液相側へ移行し、スウォーム上昇領域では気液界面では影響を与えないためであると考えられる。更に、MELCOR では、流動構造を考える上で粒子の影響は考えていない。実験結果は、MELCOR と同様に粒子の有無、性質によってスウォーム速度に影響がないことが示唆された。

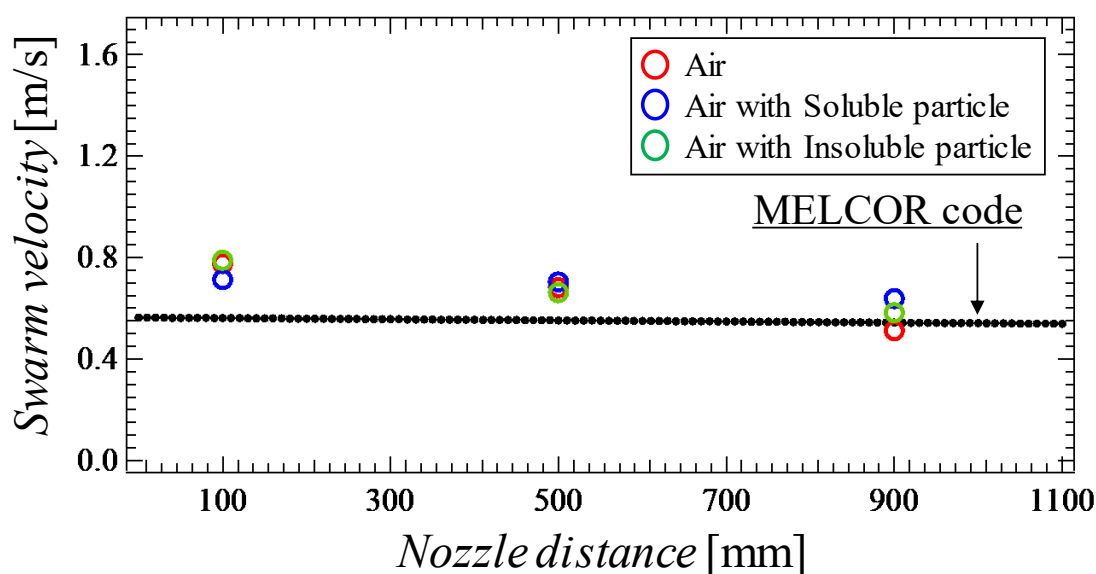


図 5-37 各ノズルからの距離における噴流気相速度

5.5.5. 気泡形状評価

除染係数(DF)を算出する際に、気泡径、アスペクト比は重要である。MELCORにおいては、気泡径が小さいほど、またアスペクト比が高いほど DF が高いことが確認されている。凝縮性ガスを含まない非凝縮性ガスのみ条件においては、スウォーム上昇領域では気泡径は 7.01 mm、アスペクト比は 1.461 の気泡の集合体であると考えられている。そこで噴流の全ての気泡計測を行うため、WMSによって算出された気泡長辺と体積等価直径からアスペクト比の算出を行った。

図 5-38 が WMS によって各ノズルからの距離における計測されたアスペクト比と気泡径の関係である。分布を明確に示すため、可溶性、不要性は分けて示す。

赤色のプロットが空気単相、青色のプロットが可溶性エアロゾルの Hyflo supercel を含む固気二相流である。緑色のプロットが不溶性エアロゾルの硫酸バリウムを含む固気二相流である。黒い実線が以下の式で定義される MELCOR にて定義されている式である^[1]。

$$\frac{a}{b} = \begin{cases} 1 & (d_B < 0.15 \text{ cm}) \\ 0.817 + 1.13466d_B - 0.3795d_B^2 & (0.15 < d_B < 1.3 \text{ cm}) \\ 1.675 & (d_B > 1.3 \text{ cm}) \end{cases} \quad (5-13)$$

黒い一点鎖線は以下で定義される Wellek らの式である。(Wellek et.al.,1966)^[20]

$$\frac{a}{b} = 1 + 0.163E_o^{0.757} \quad (5-14)$$

黒い点線は以下で定義される Okawa らの式である。(Okawa et al., 2002)^[11]

$$\frac{a}{b} = 1 + 1.97E_o^{1.3} \quad (5-15)$$

E_o 数は以下の式で表される。 g は重力加速度、 ρ_L は液相密度、 ρ_g は気相密度、 σ は表面張力である。

$$E_o = \frac{g(\rho_L - \rho_g)d_B^2}{\sigma} \quad (5-16)$$

d_B は気泡径であり、下記の式で定義される。本実験においては体積等価直径を使用した。

$$d_B = \sqrt[3]{a^2b} \quad (5-17)$$

a は楕円近似された気泡の長辺、 b は楕円近似された気泡の短辺である。

MELCOR では 15 mm 以下の小気泡は真円状であり、130 mm 以上の大気泡は扁平楕円体として考えられている。また、Wellek らの式は初期速度が遅く、Okawa らの式は様々な条件実験を

行い、上限を取ったものである。どちらも単一気泡条件であるが二相流の分裂などが単一気泡の変形とも同様と考えて使用している。

結果から、空気単相、可溶性、不溶性のエアロゾルを含む条件において分布は同様であることが確認できた。

上流では MELCOR に良好な一致を示すが、下流に行くに従って MELCOR との大きな差が確認できる。MELCOR の式(29)におけるアスペクト比は、グローブール領域の大気泡が分裂し、気泡群となって上昇するスウォーム上昇領域で適応できる相関式である。しかし、実験結果からはグローブール領域ではアスペクト比の分布は狭く MELCOR の式(51)と良好な一致が示されるが、スウォーム上昇領域ではアスペクト比の分布は広く MELCOR の式(51)と差が生じることが確認された。

そのため、これらの気泡径、アスペクト比分布のヒストグラムを示したものが図 5-39 である。左のグラフは、横軸が気泡径、縦軸が全体に対する割合である。黒線は MELCOR で使用されている 7.01 mm である。右のグラフは、横軸がアスペクト比、縦軸が個数である。黒線は MELCOR で使用されている 1.461 である。

結果から、MELCOR で考えられている気泡径 7.01 mm とは最頻値は異なることが確認できる。ノズル近傍の 100 mm の領域では、空気単相のみの条件、可溶性粒子を含んだ条件、不溶性粒子を含んだ条件において、大気泡支配的であり MELCOR で考えられている気泡径 7.01 mm に比べ大きい値のピークを確認できる。その後、大気泡がブレイクアップし MELCOR で考えられている気泡径 7.01 mm に近い値を確認できた。また、可溶性粒子を含んだ条件において MELCOR に比べ小さい気泡径のピークが確認できた。これは、可溶性粒子が界面活性剤の役割をしたことにより気泡のブレイクアップが早くなった為だと考える^[21]。最終的に、空気単相のみの条件、可溶性粒子を含んだ条件、不溶性粒子を含んだ条件において MELCOR に比べ小さい値のピークを示すことを確認できた。

また、アスペクト比頻度からノズルからの距離に関わらず同様な傾向を示し MELCOR で定義されている値に比べ小さいことを確認した。界面活性剤を微量添加した結果、気泡の合体が発生しないことから気泡径のばらつきがなくなるという知見がある。しかし、本実験においてはそのような挙動は確認できなかった。

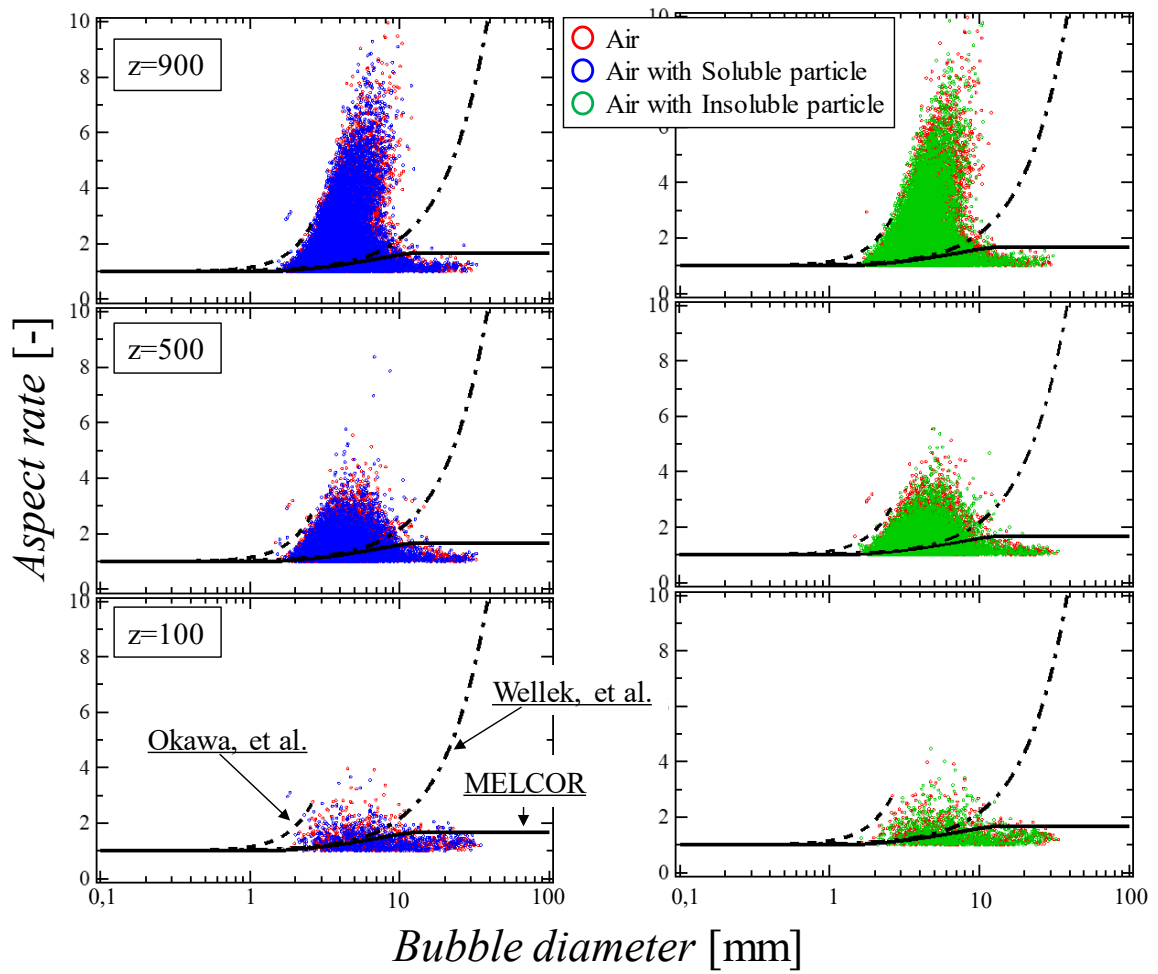


図 5-38 ノズルから各距離における気泡径とアスペクト比の関係

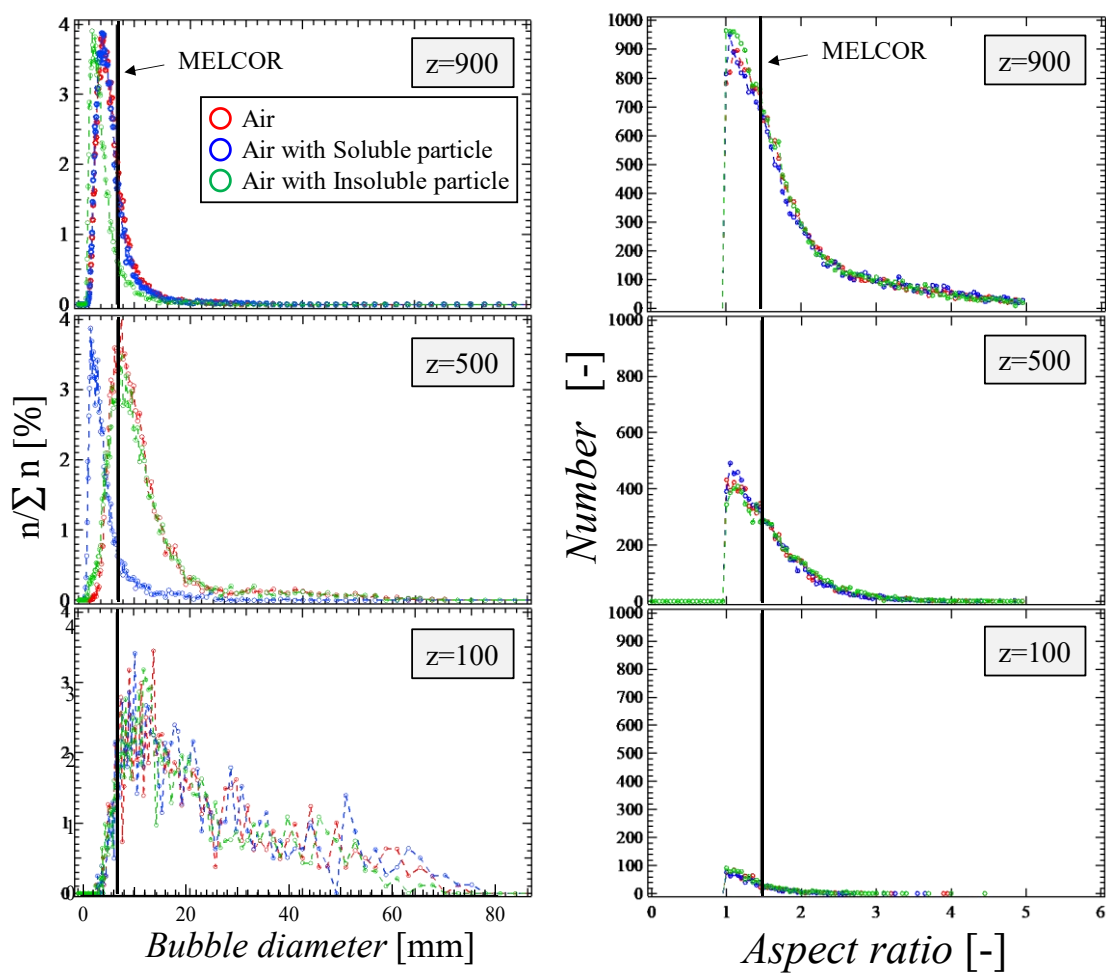


図 5-39 WMS によって算出された気泡径, アスペクト比分布

5.5.6. 可溶性エアロゾル濃度による影響

MELCORにおいてDFを算出する際には粒子の濃度は考えられていない。^[1]そのため、粒子の濃度を与える流動構造への影響を調べた。エアロゾル粒子に可溶性のHyflo supercelを用いてエアロゾルを放出し放出から10sのボイド率、気相速度の計測をWMSを用いて行った。条件として流量は50 L/minであり、計測地点はノズルとWMSの距離は500 mmである。図5-40に時間あたりの個数濃度である。赤色四角のプロットが高濃度で放出した条件、青色丸のプロットが低濃度で放出した条件ある。オーダーとして変わる差ではないが有意な差であると言える。図5-41にエアロゾル濃度による10sの時間平均ボイド率、気相速度の違いを示す。左のグラフが時間平均ボイド率である。縦軸がボイド率、縦軸がボイド率、横軸は水平方向の距離であり、中心がノズル位置、左右が水槽の壁面である。右のグラフが時間平均気相速度である。縦軸が気相速度、横軸は水平方向の距離である。

ボイド率は高濃度エアロゾル条件において、空気単相の条件、低濃度条件に比べ低い値を示すことが確認できた。それに対し、気相速度は、分布に大きな差がないことを確認できる。一般的に、気液界面にエアロゾル粒子が付着し界面活性剤の役割をすることでスリップの関係から気泡の上昇速度が低下することが知られている。^[21]しかし、今実験では、気相速度の低下は見られなかった。これは、エアロゾル粒子が計測地点では界面に十分な濃度でないことが原因であると考ええる。また、気相速度が変化していないのに対し、ボイド率は変化している点は気泡形状、個数などである可能性が示唆された。

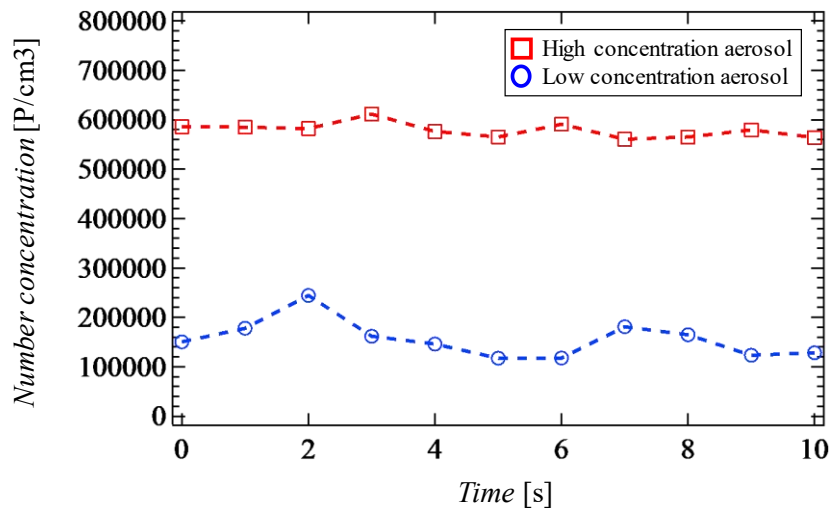


図 5-40 時間あたりの個数濃度変化

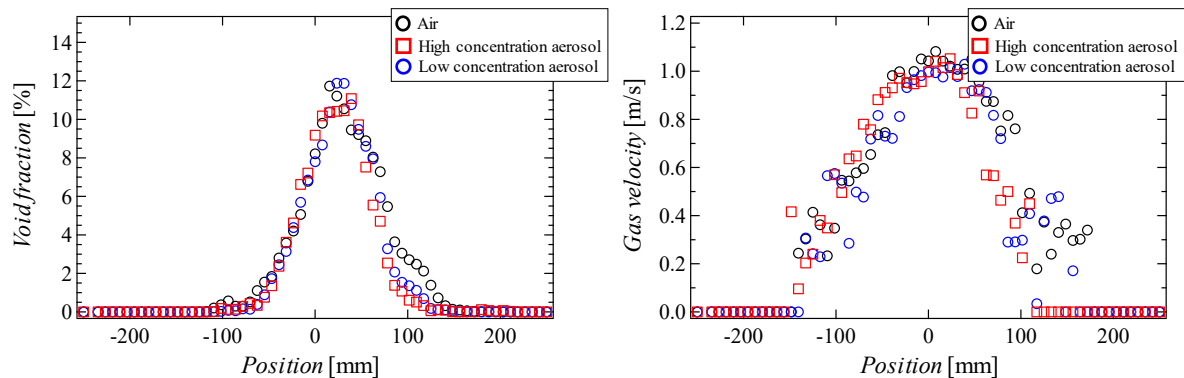


図 5-41 エアロゾルの濃度の違いによるボイド率，気相速度

5.5.7. 計測時間妥当性評価

非定常で複雑な噴流の流動構造を WMS 計測する上で計測時間を定めることは重要である。ここで、計測時間による流動構造計測結果を図 5-42 に示す。エアロゾル粒子に不溶性の硫酸バリウムを用いてエアロゾルを放出し放出から 10 s, 120 s のボイド率，気相速度，気泡径分布を WMS によって 1250 Hz で計測を行った。条件として流量は 50 L/min であり，計測地点はノズルと WMS の距離は 100 mm, 500 mm, 900 mm である。黒色の丸のプロットが空気単相で計測時間が 10 s の条件，青色の丸のプロットが空気単相で計測時間が 120 s の条件である。また，黒色の三角のプロットが空気単相で計測時間が 10 s の条件，青色の三角のプロットが空気単相で計測時間が 120 s の条件である。

左のグラフが時間平均ボイド率である。縦軸が時間平均ボイド率，横軸は水平方向の距離であり，中心がノズル位置，左右が水槽の壁面である。中央のグラフが時間平均気相速度である。縦軸が気相速度，横軸は水平方向の距離である。右のグラフは縦軸が計測された全体に対する気泡の割合，横軸が気泡径である。

結果から，ボイド率は計測時間によって有意な差は生じないことが確認できた。また，ノズルから 500 mm 下流の領域において計測時間 10 s では空気単相，エアロゾル粒子を含む条件において噴流の非定常性からピークがノズル中央ではなく左右に移動していることが確認できるが，計測時間 120 s ではピークはノズル中央になることが確認できる。しかし，値としては大きな差は生じないことが確認できた。気相速度では，計測時間 10 s に比べ 120 s では値がなめらかになっていることが確認できる。しかし，有意な差ではないと言える。最後に，気泡径分布では，ノズル近傍 100 mm の領域では 120 s ではばらつきが少ないことを確認できる。

更に，気泡径分布では，ノズルから距離において，計測時間に関係せず同様の傾向を示した。ノズルから下流になるにつれ計測時間の長い 120 s では小気泡寄りになるのは，割合で算出しており計測時間が長いことで大気泡に対し，全体の殆どを占める小気泡が多く計測されたためであると考えられる。

最後に，計測時間を伸ばした条件においてもボイド率，気相速度は空気単相，エアロゾル粒子を含む条件で大きな差は生じないことが確認できた。また，気泡径分布に関しては，エアロゾル粒子に硫酸バリウムを用いた条件において 120 s の長時間計測した場合，MELCOR で定義されている気泡径と近い位置にピークを持つことが確認した。

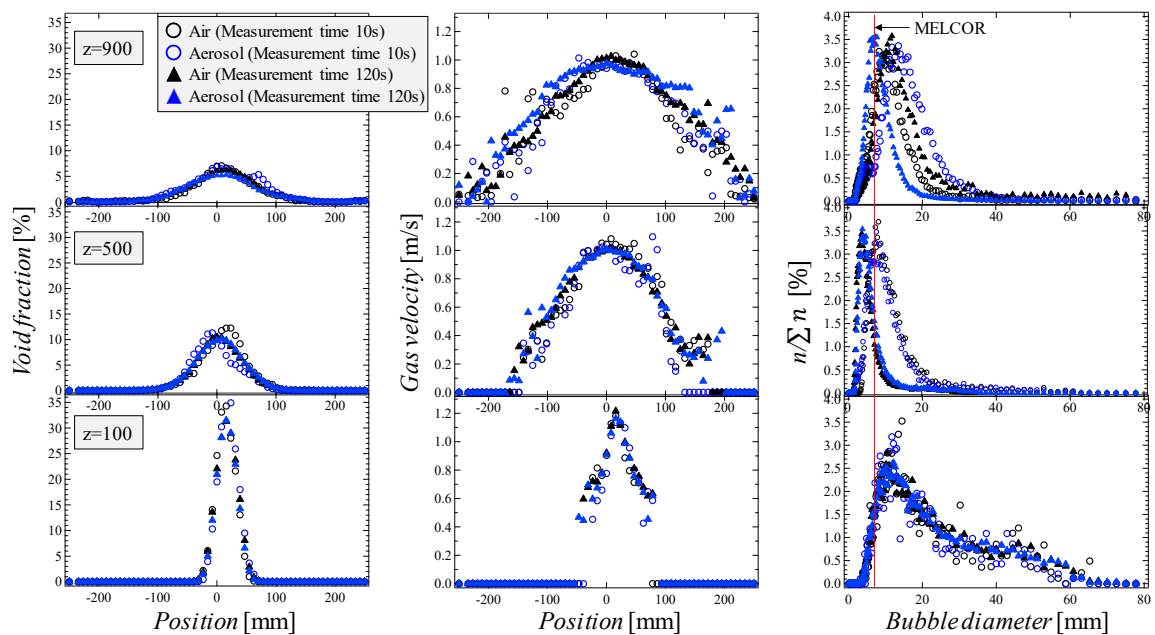


図 5-42 計測時間の妥当性評価

5.5.8. WMS 気泡形状計測妥当性評価

WMS によって算出された気泡径、アスペクト比の妥当性確認を行った。図 5-43 に WMS によって算出された気泡径、アスペクト比の関係と画像処理によって算出された気泡径、アスペクト比の関係を示す。5.5.5 項で説明した縦軸がアスペクト比、横軸が気泡径である。赤色のプロットが画像処理によって算出された値、青色のプロットが WMS によって算出された値である。結果から、画像処理によって算出された値に比べ、WMS によって算出された値は、大気泡のアスペクト比が 1.0 に近い値が多く、小気泡が計測されていないことが示唆された。図 5-44 にその際の気泡径の頻度を示す。その結果、傾向としては同様であるが、WMS では 2 mm 程度の小気泡の計測ができておらず、また 10 mm 以上の大気泡の計測ができていないことが確認できた。これは、WMS の空間分解能の影響であると考えられる。WMS のワイヤの間隔は 7.81 mm である WMS では、ワイヤの間隔内の気泡であってもマクスウェルの方程式などを用いることで 7.81 mm 以下の気泡の計測も可能である。しかし、この 7.81 mm 間隔に例えば 2 つ以上の 7.81 mm 以下の小気泡が存在する場合、WMS では 1 つの繋がった気泡として計測してしまう可能性が示唆された。この場合、小気泡は大気泡として計測され、更に 2 つ以上の小気泡の間隔によってアスペクト比にも影響があることが示唆された。

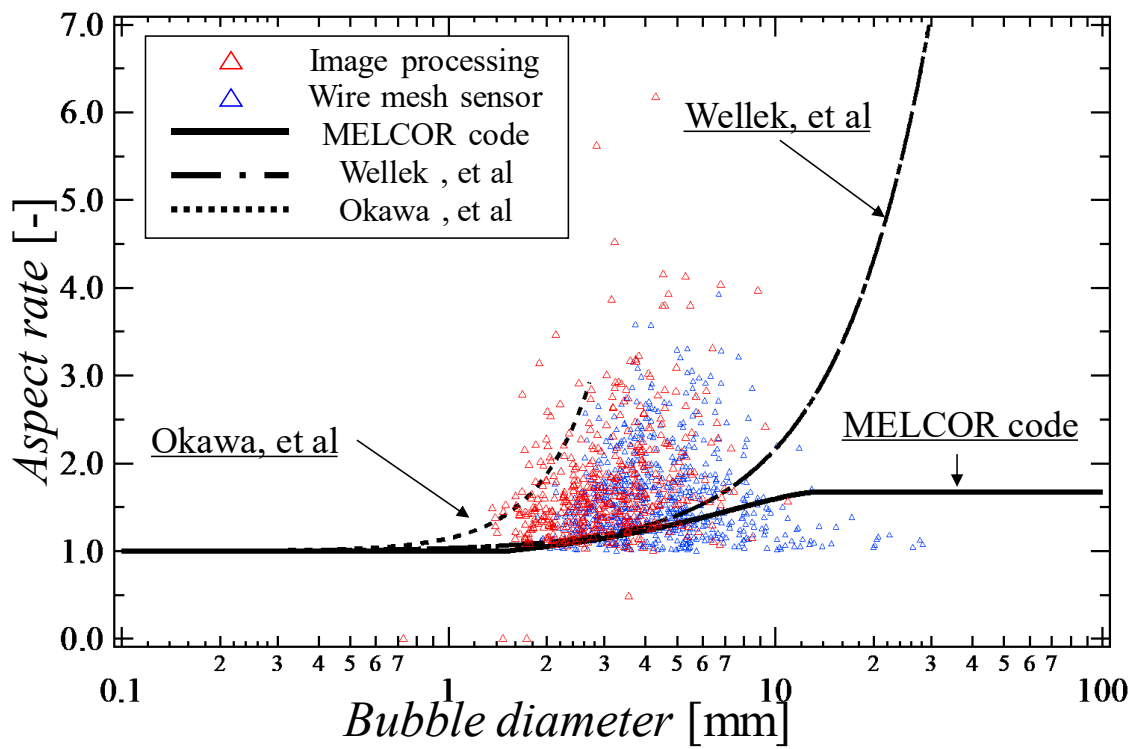


図 5-43 WMS, 画像処理による気泡径とアスペクト比の関係

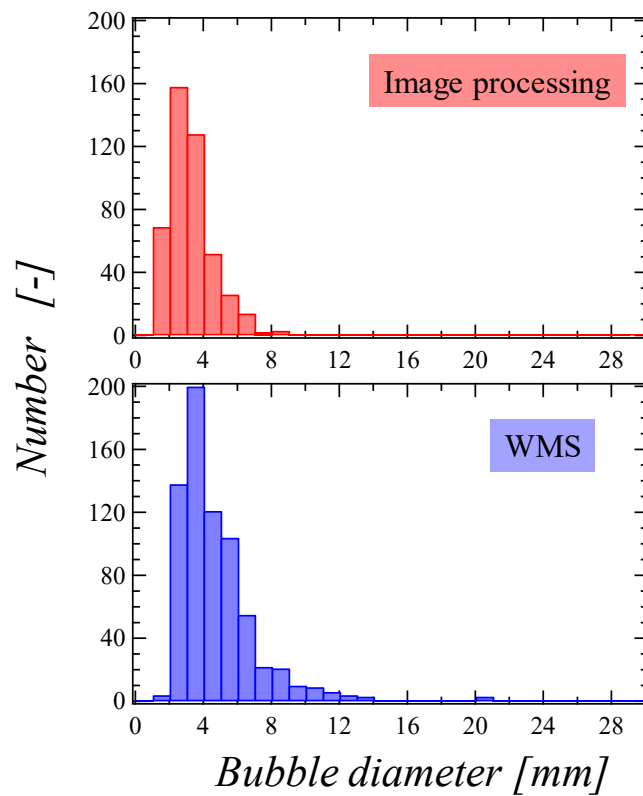


図 5-44 WMS, 画像処理における気泡径分布の差

5.5.9. エアロゾルが WMS に与える伝導率影響評価

試験部に長時間にわたり可溶性エアロゾルを放出する場合、溶けた粒子が WMS のワイヤに付着し導電率が変化することから計測に誤差が生じることが懸念される。そこで、エアロゾル放出を行う前の水のみが存在する条件で校正を行った場合、120 s 放出後に水と粒子が存在する条件で校正を行った条件で比較を行った。計測は 10 秒、空気単相を 50 L/min で放出し行った。エアロゾルが WMS に与える影響を図 5-45 に示す。左側に示すグラフは、縦軸が時間平均ボイド率、横軸が水平方向の距離である。赤色のプロットがエアロゾルを放出する前の校正データを用いた条件、青色のプロットはエアロゾルを放出後の水で校正を行った条件での結果である。結果から、校正データにエアロゾルを放出前、後で差がないことが確認できる。右のグラフは、計測されたボイド率からピーク値、噴流の平均値を用いることで定量評価を行った結果である。その結果、各ノズル距離において最大で 1.8 % 程度の誤差であることが確認できた。よって、120 s 程度のエアロゾル放出を行った場合、エアロゾルは WMS の伝導率に影響を与えないことが確認できた。

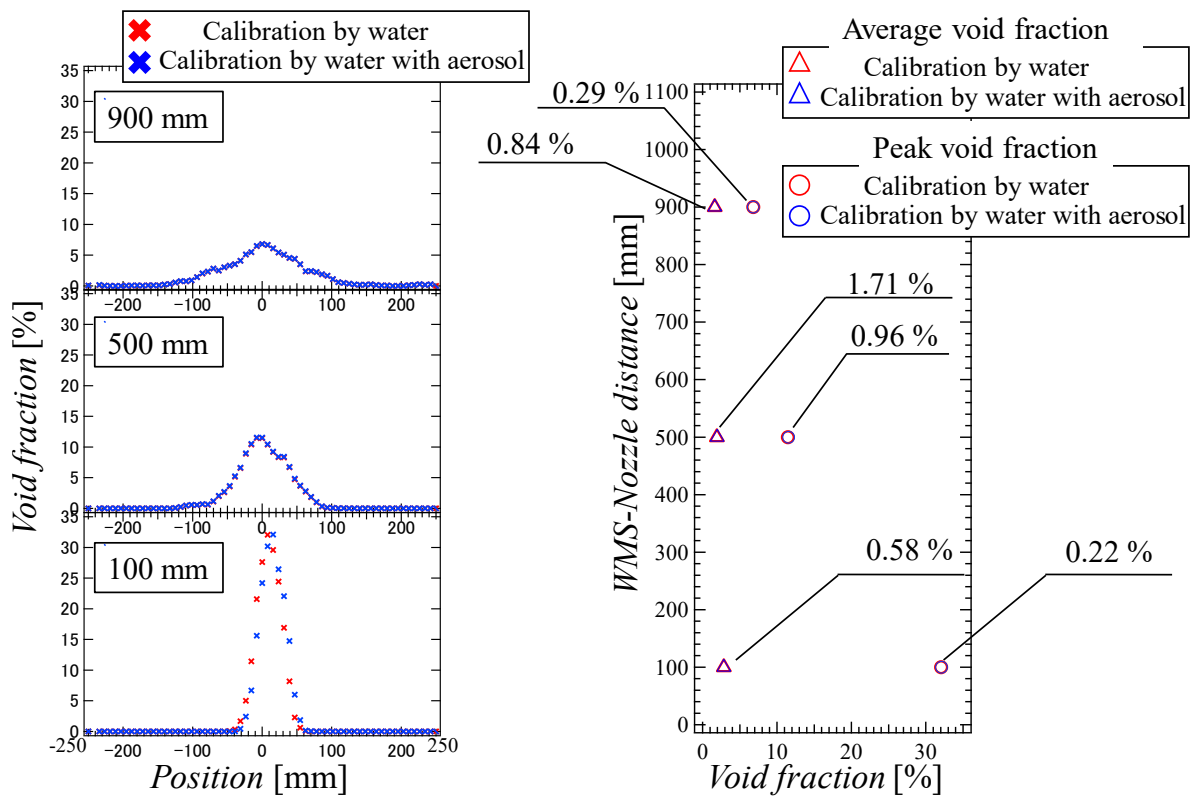


図 5-45 エアロゾルの WMS への影響

5.5.10. 気泡内除染係数評価

スウォーム上昇領域において、気泡内での除染係数の $DF_{bb,i}$ の算出を行った。MELCOR ではスウォーム上昇領域では気泡は全て扁平楕円体の気泡径 7.0 mm の集合体と考えられている。実験では、気泡径には広い分布を持つ。表 5-5 に気泡内での除染係数の $DF_{bb,i}$ を算出した際に使用した値を示す。エアロゾル粒子に代表径 0.25 μm 、密度 2360 kg/m^3 の Hyflo supercel、代表径 0.4 μm 、密度 4500 kg/m^3 のを使用した実験値の値、またその条件における MELCOR で定義されている値である。 d は気泡径である。MELCOR では、非凝縮性ガスのみ条件では 0.701 mm として定義されている。しかし、実験値では、複数の気泡が計測されるため、計算に使用する気泡径は個数平均したものを使用した。

V_r は気泡径に対する上昇速度であり、MELCOR によって下記の式で定義される。

$$V_r = 7.876 \left(\frac{\sigma}{\rho_l} \right)^{1/4} (d < 0.5 \text{ cm}) \quad (5-18)$$

$$V_r = 1.40713 \left[7.876 \left(\frac{\sigma}{\rho_l} \right)^{1/4} \right] d^{0.49275} (d > 0.5 \text{ cm})$$

ここで d は気泡径、 σ は表面張力、 ρ_l は液相密度である。

$$d = 0.7 \times 10^{-0.2265 + (0.0203 + 0.0313X_{nc})^{1/2}} \quad (5-19)$$

ここで、 X_{nc} はガス中の非凝縮性ガスのモル分率である。ここで、非凝縮性ガス 100% の条件において、 $X_{nc} = 1.0$ であり、 $d = 0.701 \text{ cm}$ である。

アスペクト比は、MELCOR によって下記の式で定義される。

$$a/b = 0.841 + 1.13466d - 0.3795d^2 (1.5 < d < 13) \quad (5-20)$$

実験値では、複数の気泡が計測されるため、計算に使用するアスペクト比は個数平均したものをを使用した。

アスペクト比は、MELCOR によって下記の式で定義される。

$$V_s = \left[\frac{Q_s + 5.33}{3.011 \times 10^{-3}} \right]^{1/2} (1 - 3.975 \times 10^{-4} \times Z) \quad (5-21)$$

表 5-5 気泡内 DF におけるパラメータ

	Soluble particle (Experiment)	Insoluble particle (Experiment)	Soluble particle (MELCOR)	Insoluble particle (MELCOR)
100 [mm]				
Vr [m/s]	0.3035	0.2957	0.2755	0.2755
Aspect ratio [-]	1.3862	1.4303	1.46122	1.46122
Diameter [mm]	8.7648	8.3131	0.701	0.701
Vsw [m/s]	0.7137	0.789	0.5613	0.5613
500 [mm]				
Vr [m/s]	0.2301	0.2851	0.2755	0.2755
Aspect ratio [-]	1.4314	1.5630	1.46122	1.46122
Diameter [mm]	4.7331	4.7452	0.701	0.701
Vsw [m/s]	0.7044	0.6619	0.5523	0.5523
900 [mm]				
Vr [m/s]	0.2301	0.2301	0.2755	0.2755
Aspect ratio [-]	1.9901	1.9140	1.46122	1.46122
Diameter [mm]	4.2653	4.2269	0.701	0.701
Vsw [m/s]	0.6379	0.5832	0.5434	0.5434

5.5.11. 気泡界面に向かう粒子の速度

図 5-47 に気泡内での速度成分の関係である。縦軸は速度，横軸が気泡中の角度である。

黒色のプロットが気泡界面に向かう粒子の速度，赤色の重力沈降による粒子の速度，青色のプロットがブラウン拡散による粒子の速度，緑色のプロットが遠心力による粒子の速度である。実線は実験によって算出された値を使用し算出した結果，点線は MELCOR において定義されている値を使用し算出した結果である。

結果から，重力沈降による粒子の速度はエアロゾル粒子によらず実験値を使用した結果，MELCOR において定義されている値において一致していることを確認できる。

ブラウン拡散による粒子の速度は，低いサブマージェンスにおいては実験値と MELCOR によって定義されている値では良好な一致を示すが，高いサブマージェンスになるに従い，MELCOR での結果は過大評価していることが確認できた。

遠心力による速度では，Hyflo supercel では全てのサブマージェンスにおいて $\theta=1.5$ において MELCOR での結果は過大評価していることが確認できた。硫酸バリウムを使用した条件では，

Hyflo supercel の条件と同様の傾向を示すものの、 $\theta = 1.5$ において Hyflo supercel に比べ MELCOR での結果は過大評価していることが確認できた。その傾向の差は、粒子の密度が影響していると考えられる。

スウォーム上昇域において粒子の駆動力として界面に向かう粒子の速度 $V_{n,i}$ を定義している。これに加えて各気泡の表面積 A 、気泡の除染時間 Δt 、そして気泡体積 v_b を使用して $DF_{BB,i}$ は以下のように表される。

$$DF_{BB,i} = \exp \left[\frac{\Delta t}{v_b} \int_{A_{surf}} V_{n,i} dA \right] \quad (5-22)$$

スウォーム上昇中の気泡において示されるような単一気泡中の流動が想定されており、界面に向かう粒子の局所離脱速度の合計値 $V_{n,i}$ は以下の式のように 4 つの駆動力による速度の合計であるとしている。

$$V_{n,j} = V_{c,i} + V_{D,i} - V_{g,i} - V_V \quad (5-23)$$

$V_{c,i}$ は気泡内の旋回運動に伴い、遠心力による局所離脱速度であり、重力沈降による局所離脱速度 V_g 、ならびに界面における局所速度 V_s 、界面における曲率半径 r_c 並びに重力加速度 g を用いて以下のように表される。

$$V_{c,i} = V_{g,i} \left(\frac{V_s^2 / r_c}{g} \right) \quad (5-24)$$

界面における局所速度 V_s は気泡の上昇に伴う界面運動による速度であり、ノンスリップ、ポテンシャル流れの仮定において真球中の流れ関数を解いた Hill's Spherical Vortex (Hill et al., 1894)^[3] を扁球に拡張し (Demitrack et. al., 1983)^[4]、以下のように表される。

$$V_s = - \frac{V_z \left(\frac{r \sin \theta}{a} \right)}{\left[\left(\frac{r \cos \theta}{b} \right)^2 + \sinh^2 \xi_0 \right]^{\frac{1}{2}}} \frac{1}{[\sin \xi_0 - \cosh^2 \xi_0 \cot^{-1} \sinh \xi_0]} \quad (5-25)$$

なお, $\sinh \xi_0$, $\cosh \xi_0$ 並びに γ は以下のように表される.

$$\begin{aligned}\sinh \xi_0 &= \left[\left(\frac{a}{b} \right)^2 - 1 \right]^{-1/2} \\ \cosh \xi_0 &= \left[1 - \left(\frac{b}{a} \right)^2 \right]^{-1/2} \\ \gamma &= \left[\left(\sin \frac{\theta}{a} \right)^2 + \left(\cos \frac{\theta}{b} \right)^2 \right]^{-1}\end{aligned}\tag{5-26}$$

エアロゾルの重力沈降による局所離脱速度: $V_{g,i}$ は, $70 \mu\text{m}$ 以下の微粒子が沈降する際の終端速度を表すストークスの式より, 微粒子径 d_i , 気相密度 ρ_g , 液相の粘性係数 μ , カニンガムの補正係数 S_i , 地心緯度 β として以下のように表される.

$$\begin{aligned}V_{g,i} &= \frac{\rho_g g S_i d_i^2}{18\mu} \cos \beta \\ \beta &= \tan^{-1} \left[\frac{b^2 \tan \theta}{a^2} \right]\end{aligned}\tag{5-27}$$

V_D はブラウン運動に伴う粒子の拡散による局所離脱速度であり, 上昇気泡中の界面更新に伴う物質移動を示した Higbie penetration theory(Higbie et. al., 1935)⁵⁾を用いて以下のように表される.

$$V_{D,i} = \left(\frac{D_i}{\pi \tau_e} \right)^{1/2}\tag{5-28}$$

なお, 上式において τ_e は界面における気液界面の接触時間, D_i は粒子の拡散係数を表す.
 V_V は凝縮に伴う局所離脱速度を表す.

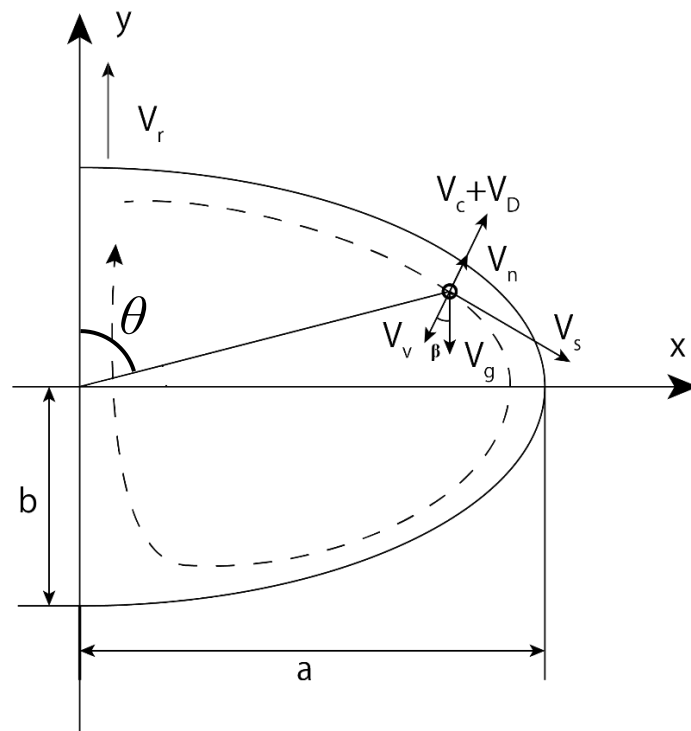


図 5-46 MELCOR モデルにおいて想定される単一気泡中流動

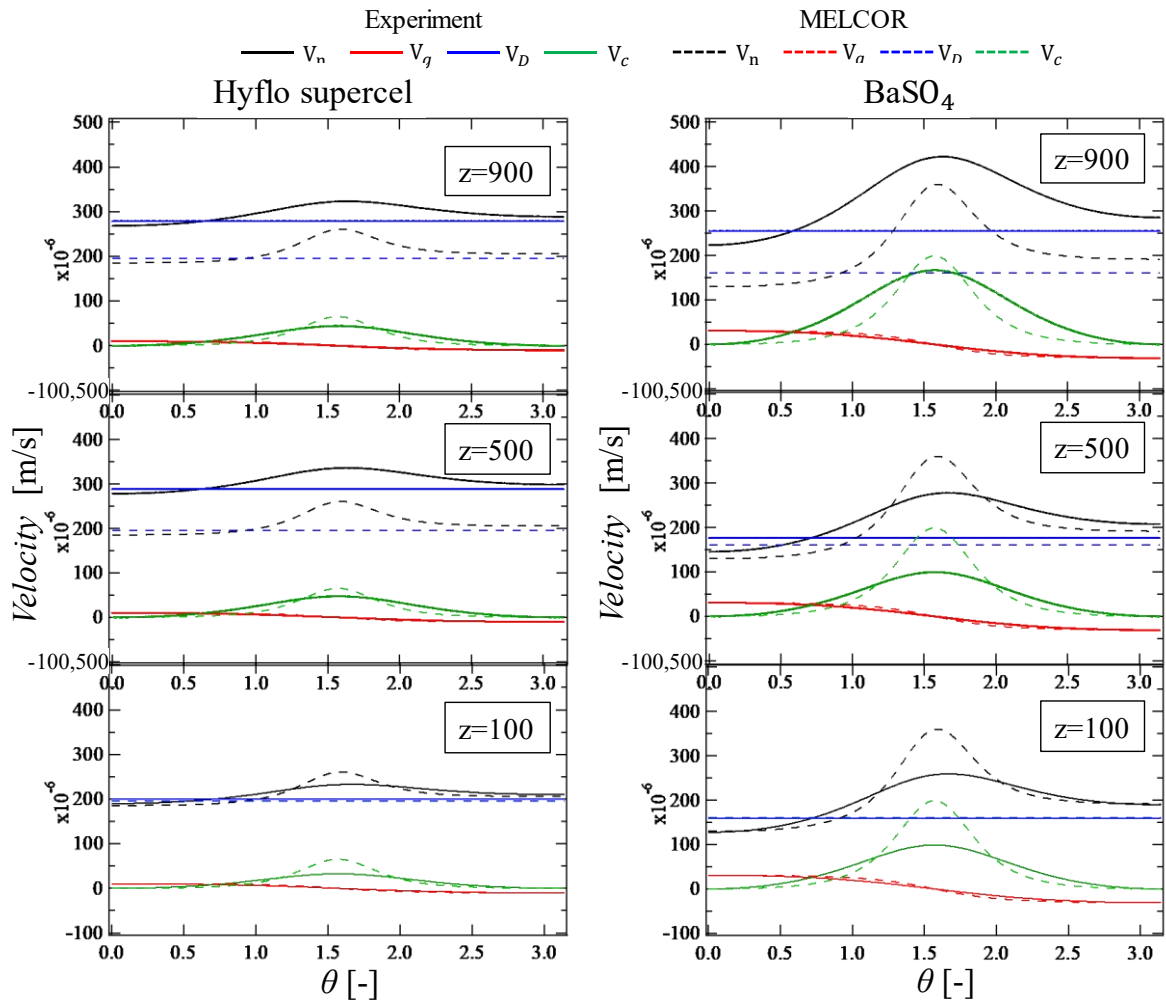


図 5-47 MELCOR 及び実験値における各粒子の気泡界面速度

5.5.12. 気泡内での除染係数評価

全気相がスウォームに含まれると仮定した DF である $DF_{BB,i}$ は、スウォーム上昇域において粒子の駆動力として界面に向かう粒子の速度 $V_{n,i}$ を定義している。これに加えて各気泡の表面積 A 、気泡の除染時間 Δt 、そして気泡体積 v_b を使用して $DF_{BB,i}$ は以下のように表される：

$$DF_{BB,i} = \exp \left[\frac{\Delta t}{v_b} \int_{A_{surf}} V_{n,i} dA \right] \quad (5-29)$$

図 5-48 にサブマージェンスごとの気泡内での除染係数に結果を示す。縦軸は気泡内での除染係数、横軸はサブマージェンスである。青色のプロットが Hyflo supercel, 緑色のプロットが硫酸バリウムを使用した条件である。丸いプロットが実験によって得たパラメータを使用した条件、四角のプロットが MELCOR で定義されているパラメータを使用した条件である。その結果、低いサブマージェンスでは MELCOR は約 10 % の過大評価、高いサブマージェンスでは約 20 % の過小評価していることが示唆された。

図 5-49 にパラメータとして使用した各種値の影響を示す。その結果、スウォーム速度、アスペクト比に関しては、高いサブマージェンスにおいて MELCOR は実験値を 10 % 以下の過大評価をしているのに対し、気泡径は高いサブマージェンスにおいて MELCOR は実験値を 50 % 以下の過小評価していることが確認できた。これは、エアロゾルを含んだことにより気泡のブレイクアップのタイミングに影響が出ていると考える。

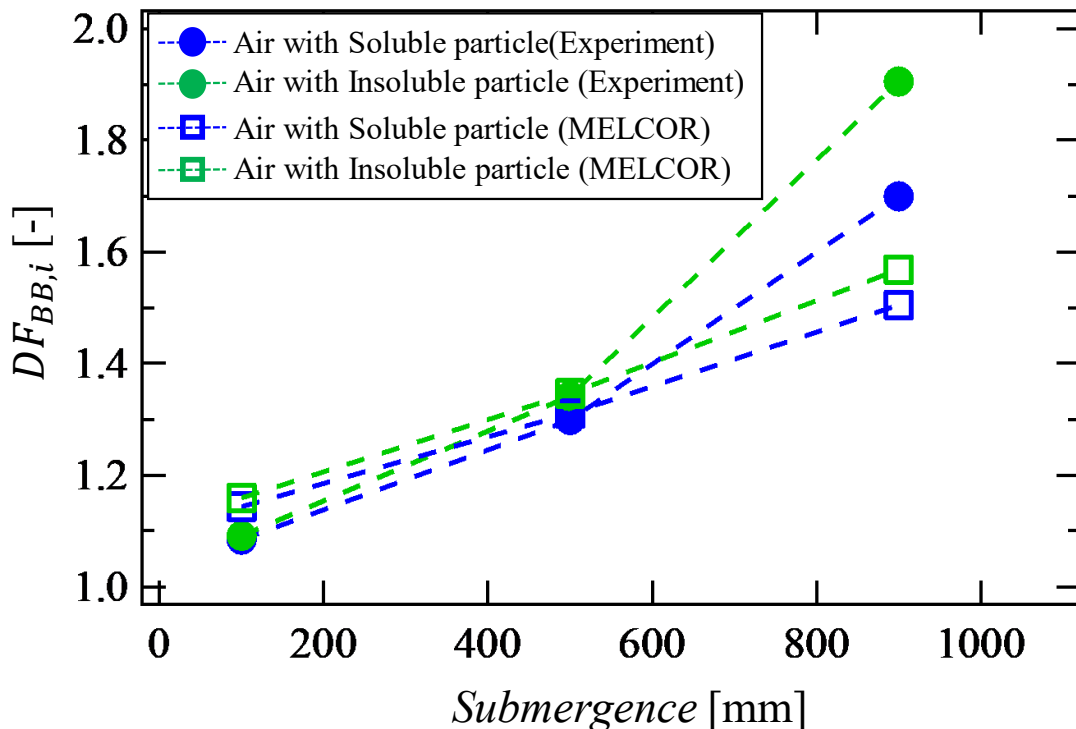


図 5-48 実験値, MELCOR におけるサブマージェンスごとの $DF_{BB,i}$

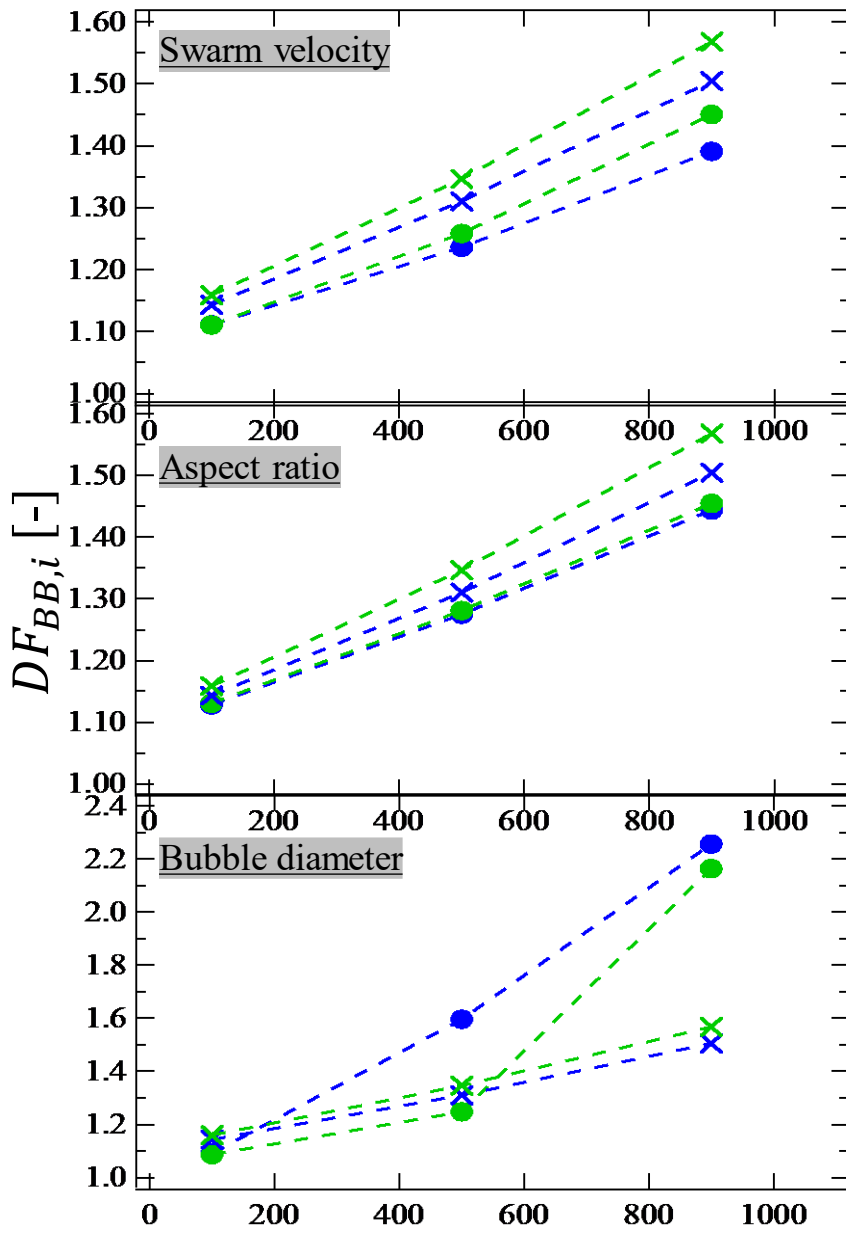


図 5-49 $DF_{BB,i}$ に関する各種パラメータの影響

5.5.13. グロビュール領域評価

ベント管から混合気が噴出し、大気泡を生成するグロビュール領域においては、気泡中における凝縮に起因する DF_{EC} 、気泡内慣性衝突に起因する DF_{Li} 、気泡内粒子の界面での慣性衝突に起因する $DF_{RR,i}$ の3つが考慮されている。薄型水槽を用いることで気泡を擬似的に二次元で可視化を行うことができ気泡内部の詳細な可視化を行うことができる。そこで、薄型水槽(500×300×3 mm)を用いてエアロゾル粒子が気相側から液相側へ移行する挙動の観測を行ったノズルからエアロゾル粒子に蛍光粒子を用いてレーザーを照射し蛍光したところをバックライト法にて撮影を行う。その際、流量を 3 L/min としノズル内径を 3 mm の条件で行った。エアロゾル粒子に蛍光粒子の不溶性代表径 15 μm の Fluostar と可溶性の代表径 0.04 μm の OX-50 を混合し使用した。混合を行う理由としては、蛍光粒子の Fluostar、ローダミンの粒径が大きく分散性が悪いことが考えられる、そこで粒径の小さく分散性に良い OX-50 と混ぜることで Fluostar、ローダミンの配管内での流動性を向上させた^[23]。

5.5.14. 水-空気条件での移行挙動

図 5-50 に薄型水槽を用いて水-空気に Fluostar を使用した条件において気泡が断続的に放出されている時の可視化画像を示す。薄型水槽を用いたことにより気泡内部の詳細な可視化ができていることが確認できる。ノズルからエアロゾル粒子が放出され、界面に衝突し気相から液相側へ移行している事が確認できる。また、気泡が離脱した際に気泡下面での界面の変形によって気泡内部においても粒子の急速な移動が確認できる。これから、本実験条件のような低流量ではノズルの流速が遅いことから慣性衝突による移行に比べ、MELCOR にて考えられていない気泡離脱による界面の変形による移行が支配的であると確認できる。

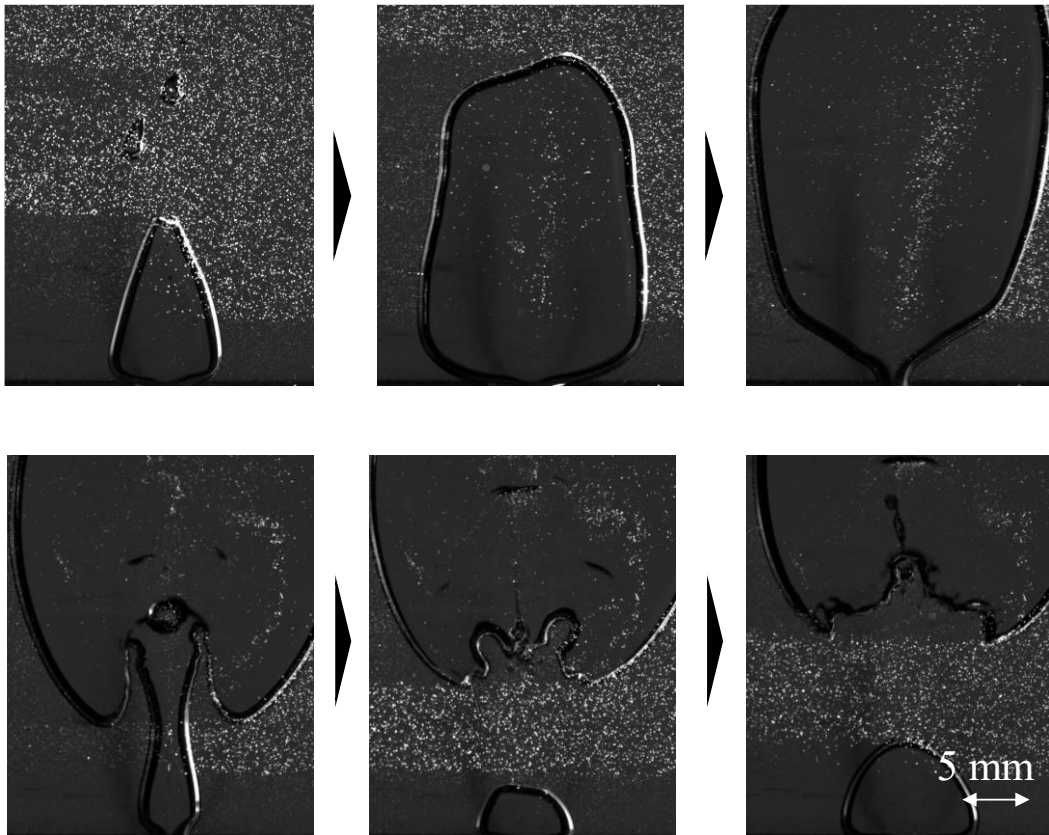


図 5-50 水-空気系における移行挙動

図 5-51 に PIV 処理をかけたものを示す．界面衝突の際に速度，さらに気泡が離脱した直後に気泡内部で急速な速度が確認できる．これは，表面張力は気泡の浮力を卓越した際に急速に速度が発生する．それにより，内部の粒子が取り残されるように移行すると考えられる．しかし，気泡成長中の際に気泡内部の粒子が可視化できているのにも関わらず速度場が算出できない結果となった．これは，気泡内の傾向粒子の濃度が高かった点，またレーザーのパワーが強かった事により傾向粒子が強く周囲に光ることにより，可視化画像の前後における移動差が算出できなかったためであると考えられる．

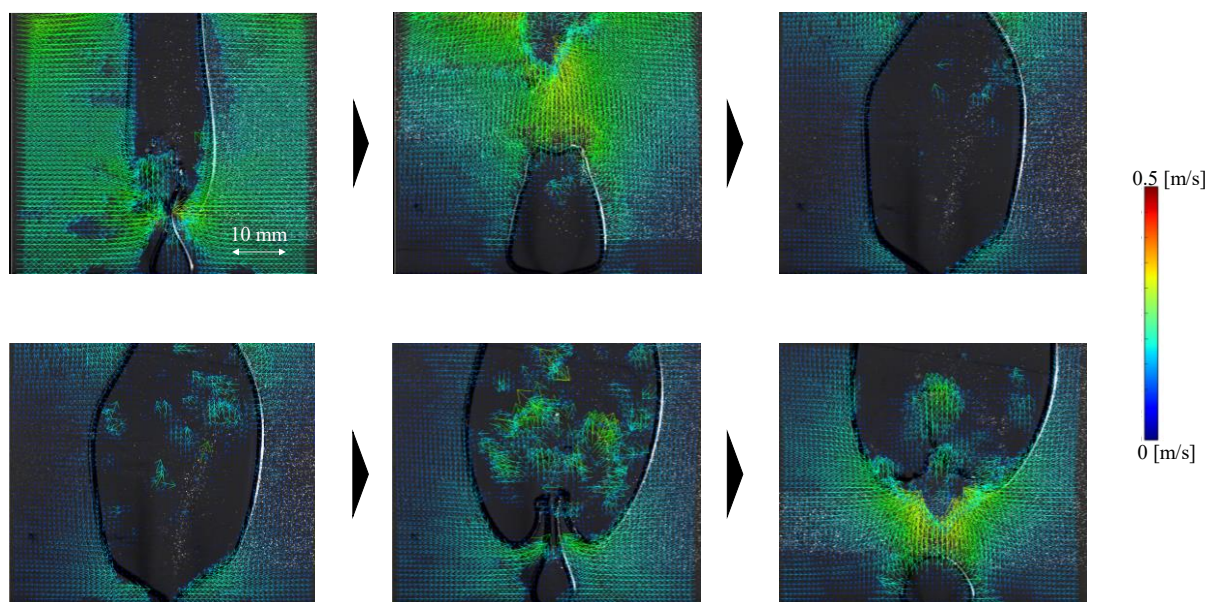


図 5-51 水-空気系における速度分布

5.5.15. 水・空気系における慣性衝突による除染係数評価

薄型水槽を用いて気泡の内部の可視化を行うことで、更に PIV 処理を行ったものを用いて評価を行った。流量は 3 L/min である。水・空気条件でのグローブ領域における慣性衝突プロセスにおける $DF_{II,i}$ の評価を行った。図 5-52 に薄型水槽を用いた水・空気系における慣性衝突による移行挙動を示す。エアロゾル粒子が慣性によって気液界面に衝突している様子を確認できる。軸対称噴流試験部に比べ気液界面を超えるほどの移行が確認できない理由としては、流量が少ないことによる流速の低さが要因である。さらに、MELCOR では、気液界面を超えなくても、気液界面に付着すれば移行であると考えられている。

図 5-53 に PIV によって算出されたノズル直後の速度の絶対値、また速度から算出した $DF_{II,i}$ の関係を示す。上のグラフは、縦軸に速度、横軸に計測時間である。また、下のグラフは縦軸に $DF_{II,i}$ 、横軸に計測時間である。 $DF_{II,i}$ は MELCOR にて以下の式を用いて計算される。^[1]

$$DF_{II,i} = \frac{1}{1 - \alpha_i} \quad (5-30)$$

$$Stk_i = \frac{\rho_i V_e d_i^2}{9\mu D_o}$$

ここで、 d_i : 粒径, ρ_i : 粒子密度, V_e : ベント管出口におけるガス速度, μ : ガス粘度, D_o : ベント管内径である。

$$\alpha_i = 1.79182 \times (3.3473 \times 10^{-11})^{(5.9244 \times 10^{-3})\sqrt{Stk_i}} \quad (\sqrt{Stk_i} \leq 0.65868) \quad (5-31)$$

$$\alpha_i = 1.13893 \times (1.4173 \times 10^{-6})^{(4.25973 \times 10^{-3})\sqrt{Stk_i}} \quad (\sqrt{Stk_i} > 0.65868)$$

なお α_i の値は、最大 0.99 に制限されている。

結果から、 $DF_{II,i}$ はベント管出口速度が支配的であることが確認できた。また、PIV によって算出された速度場は、蛍光粒子の濃度、パルスレーザーのワット数の設定により正しく計測されていない可能性がある。そのため、今後は蛍光粒子、パルスレーザーのワット数を設定し正確に計測を行う。実際に、ベント管出口におけるガス速度が支配的であるとわかり、実現象では、流速は更に高いことが予想される。それを考慮すると MELCOR において $DF_{II,i}$ は最大で 100 と考えられているが、この値を超える可能性が示唆された。更に、現状では実際に慣性衝突によって MELCOR 上における $DF_{II,i}$ を算出することができるが、実際の現象による $DF_{II,i}$ を実験から計測できていないため、妥当性評価を行えていない。そのため、今後は可視化から粒子の個数計測など実験から $DF_{II,i}$ を得ることが課題となる。

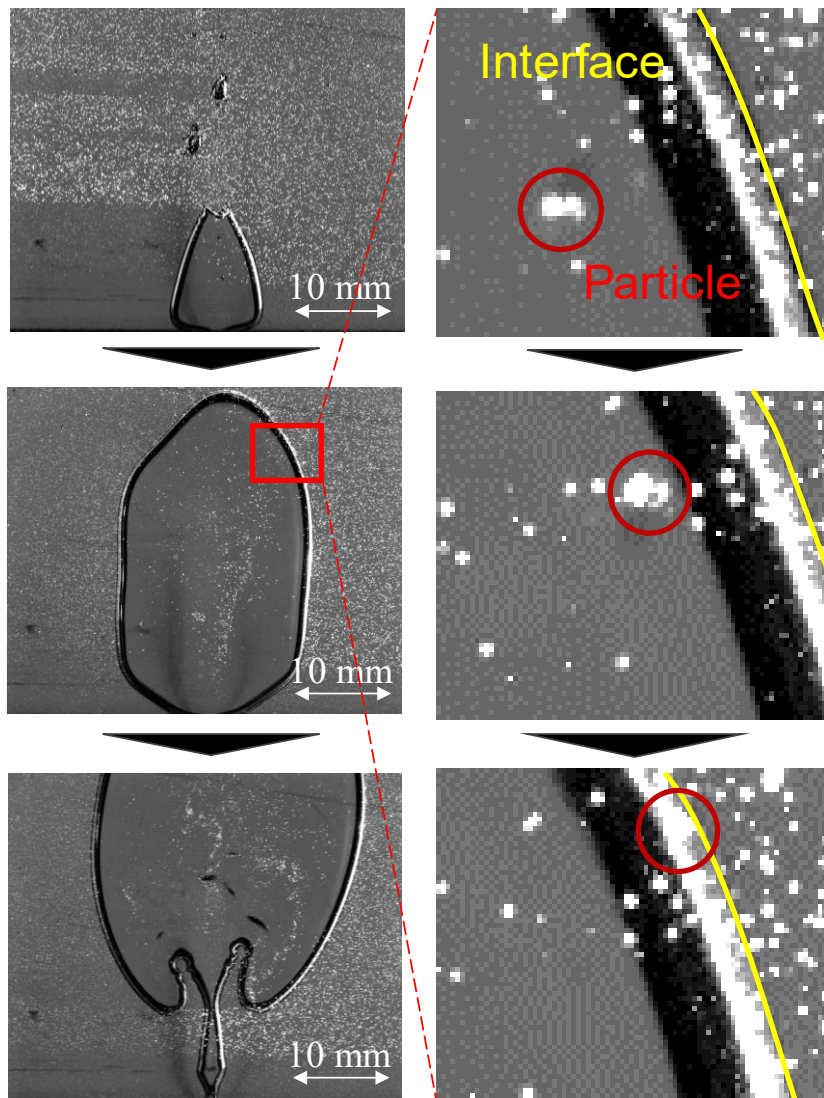


図 5-52 水-空気条件における慣性衝突による移行

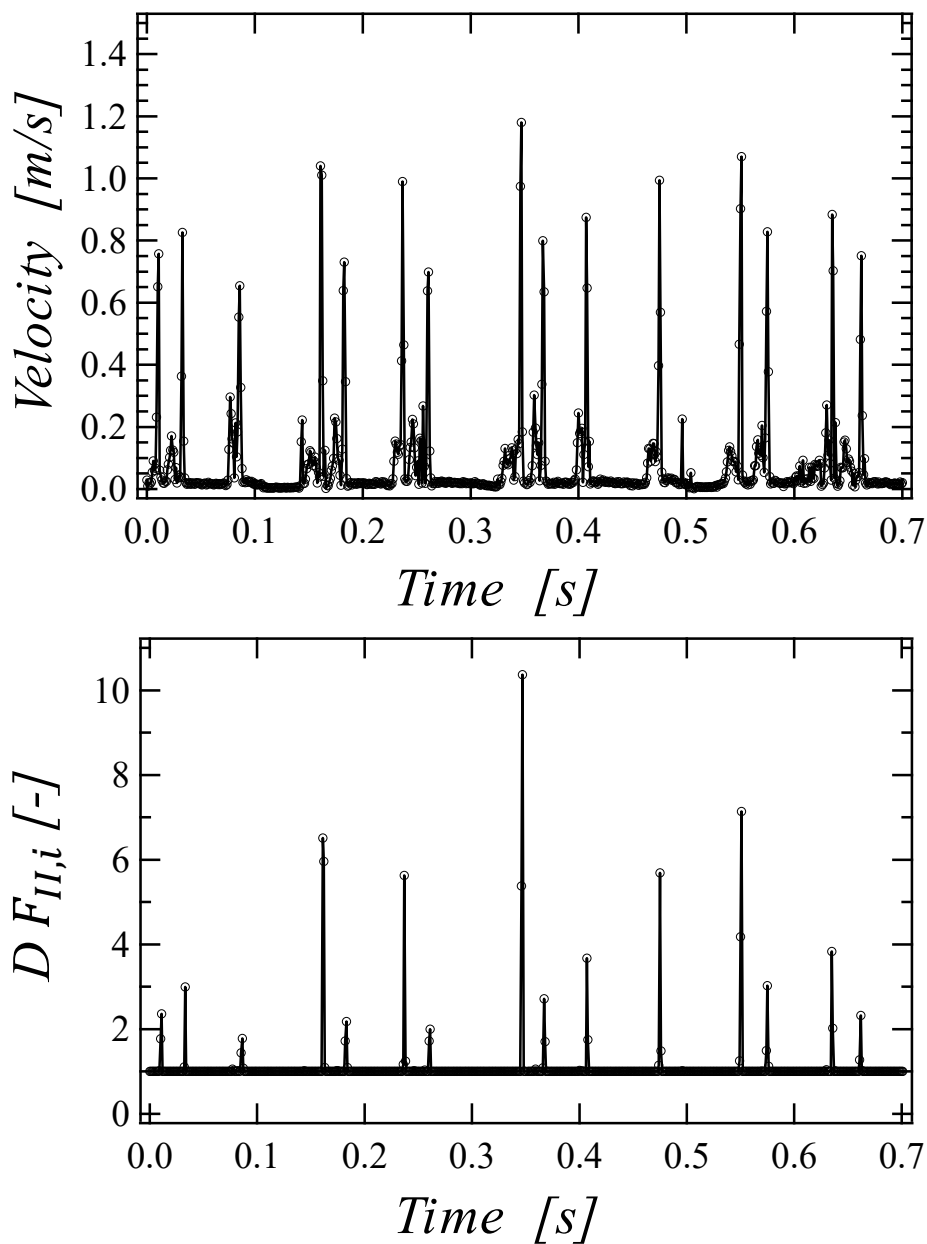


図 5-53 水-空気系におけるノズル直後速度，及び慣性衝突による $DF_{II,i}$ 結果

5.5.16. 水-蒸気条件での移行挙動

図 5-54 に薄型水槽を用いて水-蒸気に Fluostar を使用した条件において気泡が断続的に放出されている時の可視化画像を示す。水-空気系でも確認できた慣性衝突による移行，気泡が離脱する際の界面の変形による移行に加え，蒸気の凝縮により複数の粒子が同時に気相から液相側へ移行する様子が確認できる。凝縮による移行は，瞬間的にほぼすべてのエアロゾル粒子が液相へ移行することからプールスクラビングにおいて極めて支配的であり，重要であることが確認できた。

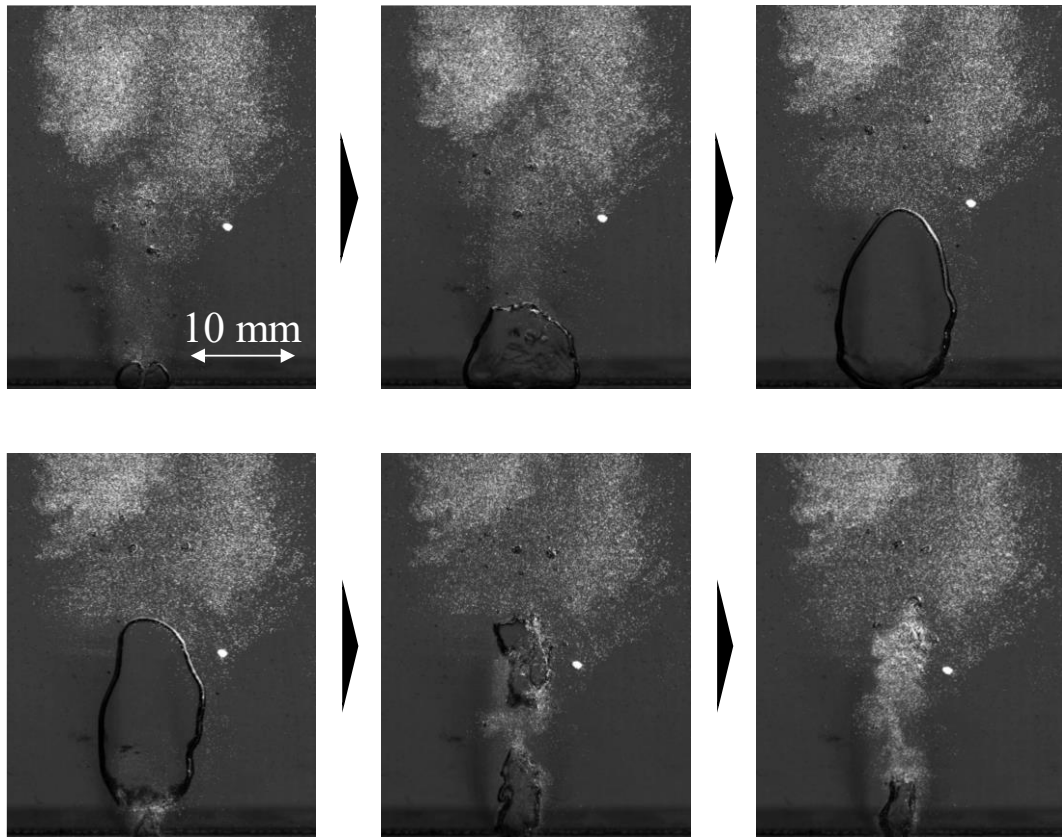


図 5-54 水-蒸気系における移行挙動

図 5-55 に PIV 処理をかけたものを示す．急速な凝縮により高い速度が確認できる．また，それにより，周囲の液相においても気泡中心に向かう速度が確認できる．その後，気泡がノズルから生成され，集中的な速度分布が上昇していることが確認できる．加えて，水-空気条件と同様に気泡下部において気泡が離脱する際に高い速度分布を確認できる．

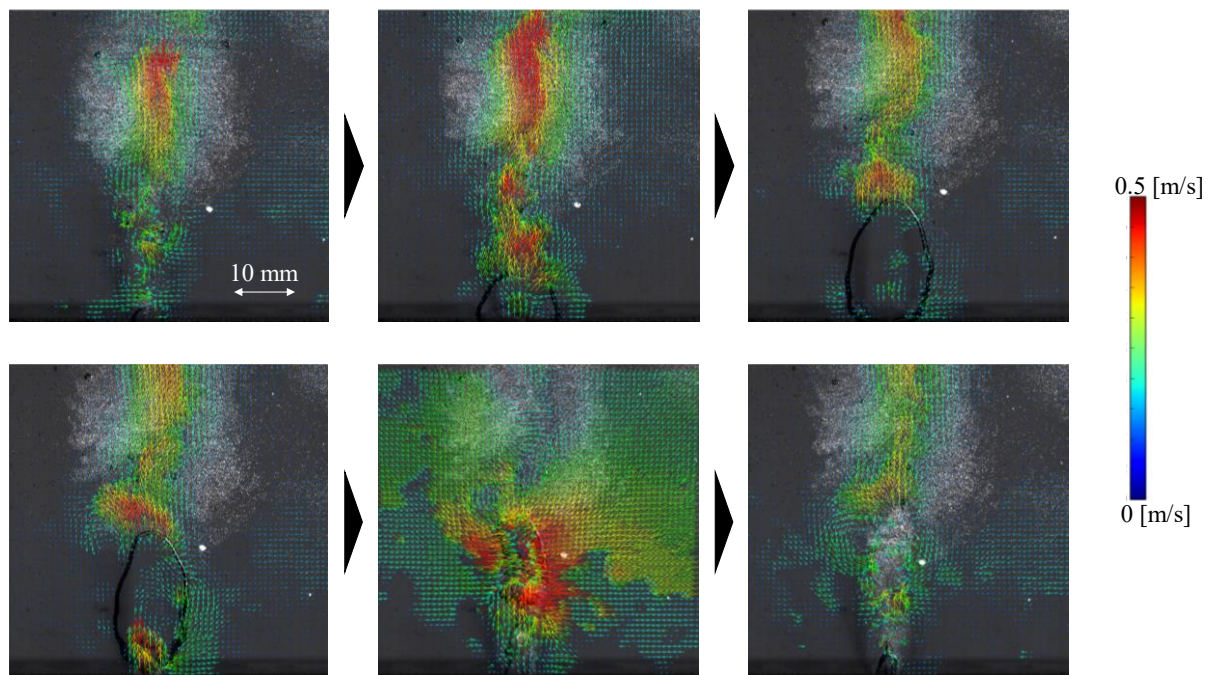


図 5-55 水-蒸気系における速度分布

水-蒸気条件でのグローブ領域における慣性衝突プロセスにおける DF_{Li} の評価を行った。図 5-56 に水-蒸気系における慣性衝突による移行挙動を示す。エアロゾル粒子が慣性によって気液界面に衝突している様子を確認できる。薄型水槽を用いて気泡の内部の可視化し PIV 処理を行ったものを用いて評価を行った。流量は、薄型水槽を用いたため、高流量であると試験部から水が溢れてしまうため、低流量で実験を行った。そのため、蒸気流量計の計測範囲外であり計測を行えなかった。図 5-57 に PIV によって算出されたノズル直後の速度の絶対値、また速度から算出した DF_{Li} の関係を示す。上のグラフは、縦軸に速度、横軸に計測時間である。また、下のグラフは縦軸に DF_{Li} 、横軸に計測時間である。結果から、 DF_{Li} は水-空気条件と同様にベント管出口速度が支配的であることが確認できた。水-空気条件に比べ流量が少ないため、流速も低い結果となった。そのため、 DF_{Li} も小さい値を示した。水-蒸気条件では、全行程において凝縮による移行が大半であるが、慣性衝突によって移行する粒子の確認を行うことができた。

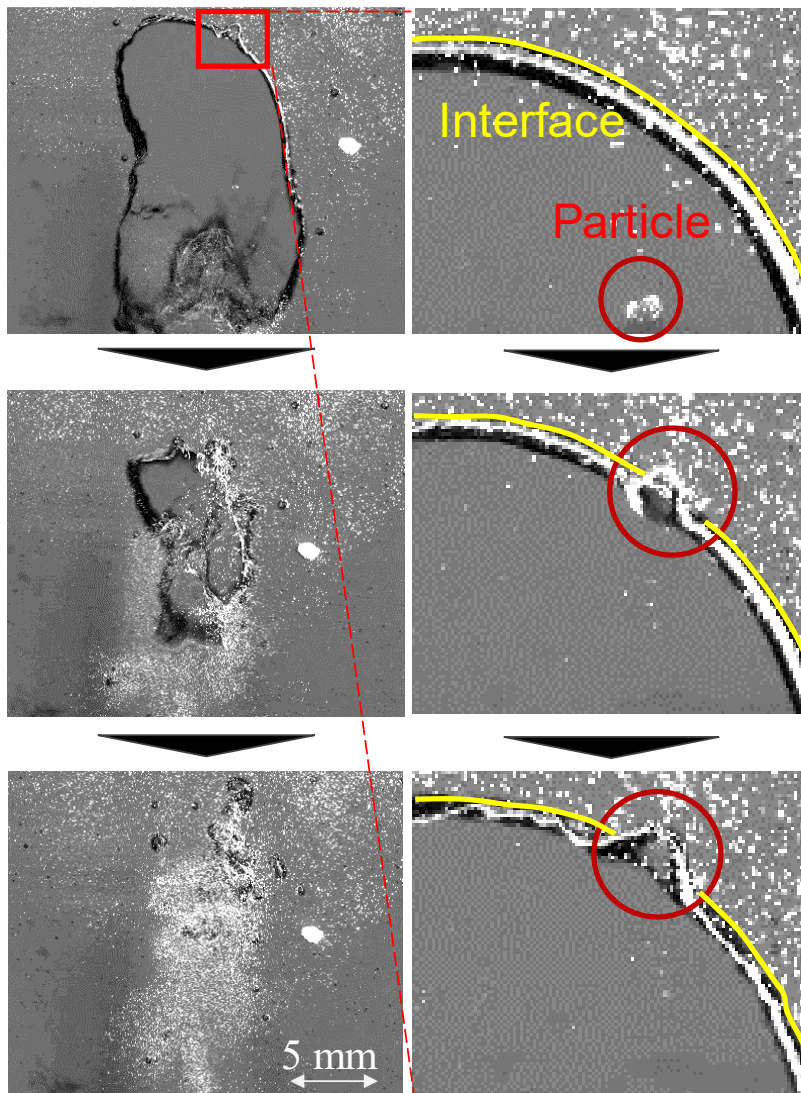


図 5-56 水-蒸気条件における慣性衝突による移行

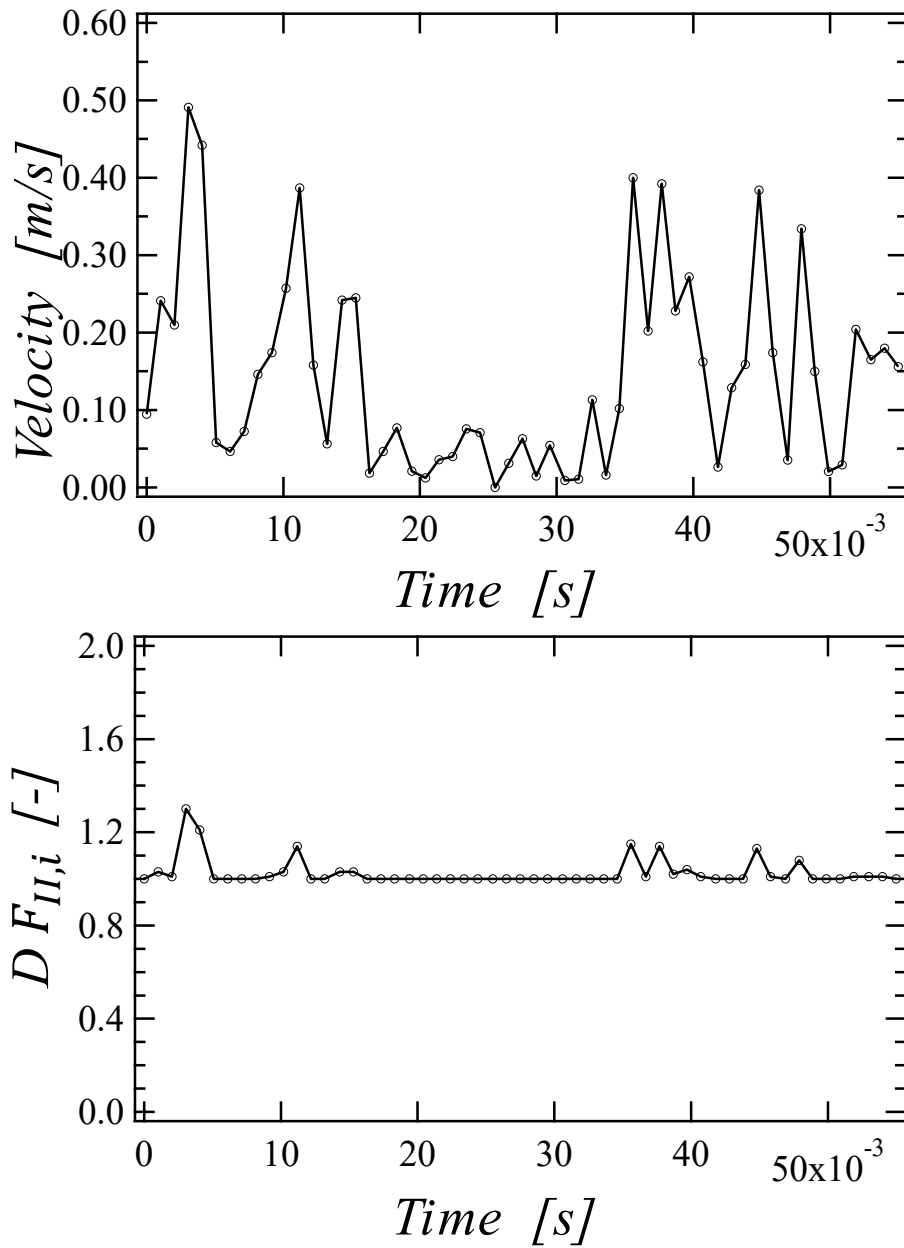


図 5-57 水-蒸気系におけるノズル直後速度，及び慣性衝突による $DF_{II,i}$

5.5.17. 水-蒸気系における凝縮による除染係数評価

ベント管から混合気が噴出し、大気泡を生成するグロービュール領域においては、気泡中における凝縮に起因する DF_{EC} の結果について示す。

ノズル近傍のグロービュール領域において、蒸気の凝縮によって移行する様子を図 5-58 に示す。

モル分率とは、混合物質の物質質量の割合である。 $X_I = 0$ は、入口のガスの非凝縮性ガスのモル分率であり、今条件においては、凝縮性ガス 100 % であるため、入口の非凝縮性モル分率: $X_I = 0$ となる。更に、平衡化後におけるガスのモル分率は下記により MELCOR で定義されている。そして、それらの値を用いることで、下記により凝縮による除染係数 DF_{EC} は定義されている^[1]。

$$X_0 = 1 - \frac{P_{sat}(T)}{P_I - \rho_l g h} \quad (5-32)$$

$$DF_{EC} = \frac{X_0}{X_I} = \infty$$

この時、 $P_{sat}(T)$: プール温度 T におけるガス飽和圧力、 P_I : プール内圧力、 ρ_l : プール密度、 h : 水位 である。

MELCOR にて定義されている式で評価を行ったところ、凝縮による除染係数 DF_{EC} は ∞ (MELCOR では最大値 10^{13}) を取る結果となった。実際に、可視化結果からも、凝縮により分裂し凝縮性ガスによる気泡が生成されるものの、ほとんどのガス内の粒子が液相側へ移行している事を確認できる。

今後は、凝縮性ガスと非凝縮性ガスを混合しモル分率を変更することが重要である。更に、モル分率による蒸気噴流の regime map^[24] を用いて、MELCOR にて考えられている流動構造を形成するか評価を行う。そのためには、凝縮性ガスと非凝縮性ガス、更にエアロゾルの混合の問題、更に、脱気の問題、更に高いサブマージェンスの評価が課題となる。

MELCOR は熱泳動を考慮していない。水蒸気モル分率が高い条件においてはグロービュール領域において全量凝縮しなかった場合、スウォーム上昇領域では、熱泳動による評価が行えていない。そのため、今後は水蒸気モル分率が高い条件におけるスウォーム上昇領域での計測を行う。

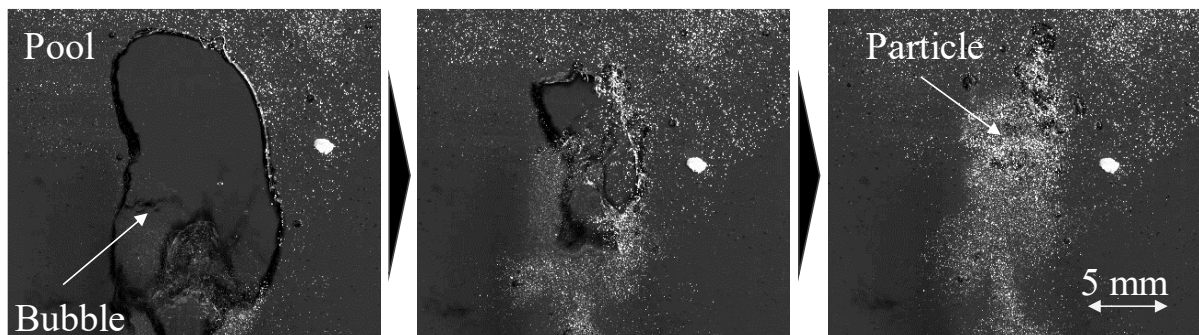


図 5-58 蒸気凝縮による移行挙動

5.5.18. 薄型水槽妥当性確認

本実験で使用した軸対称噴流装置と薄型水槽の対応に関する妥当性確認を行った。どちらもノ

ズル内径は 3 mm で統一している．どちらの条件においても同様な移行挙動を確認でき定性的に妥当性確認を行った．壁面の影響はあると考える．しかし，移行挙動においては同様の傾向を示し，PIV でも粒子が気泡の流れ場に沿って移動していることから，移行挙動を可視化する上では問題ないと考える．加えて，薄型水槽を用いた実験では試験部の厚さが薄いことから水を蓄えることができないため，高流量でエアロゾルを放出することができないのが現状である．そのため，軸対称噴流に比べ低流量かつ低流速であるため挙動に差は生じる可能性がある．今の課題として，薄型水槽の妥当性を定量的に求められる．ノズル内径が同一で設計を行ったため，同一流量でエアロゾルを放出し，ノズル流速を一致させた上で評価を行うことが必要である．

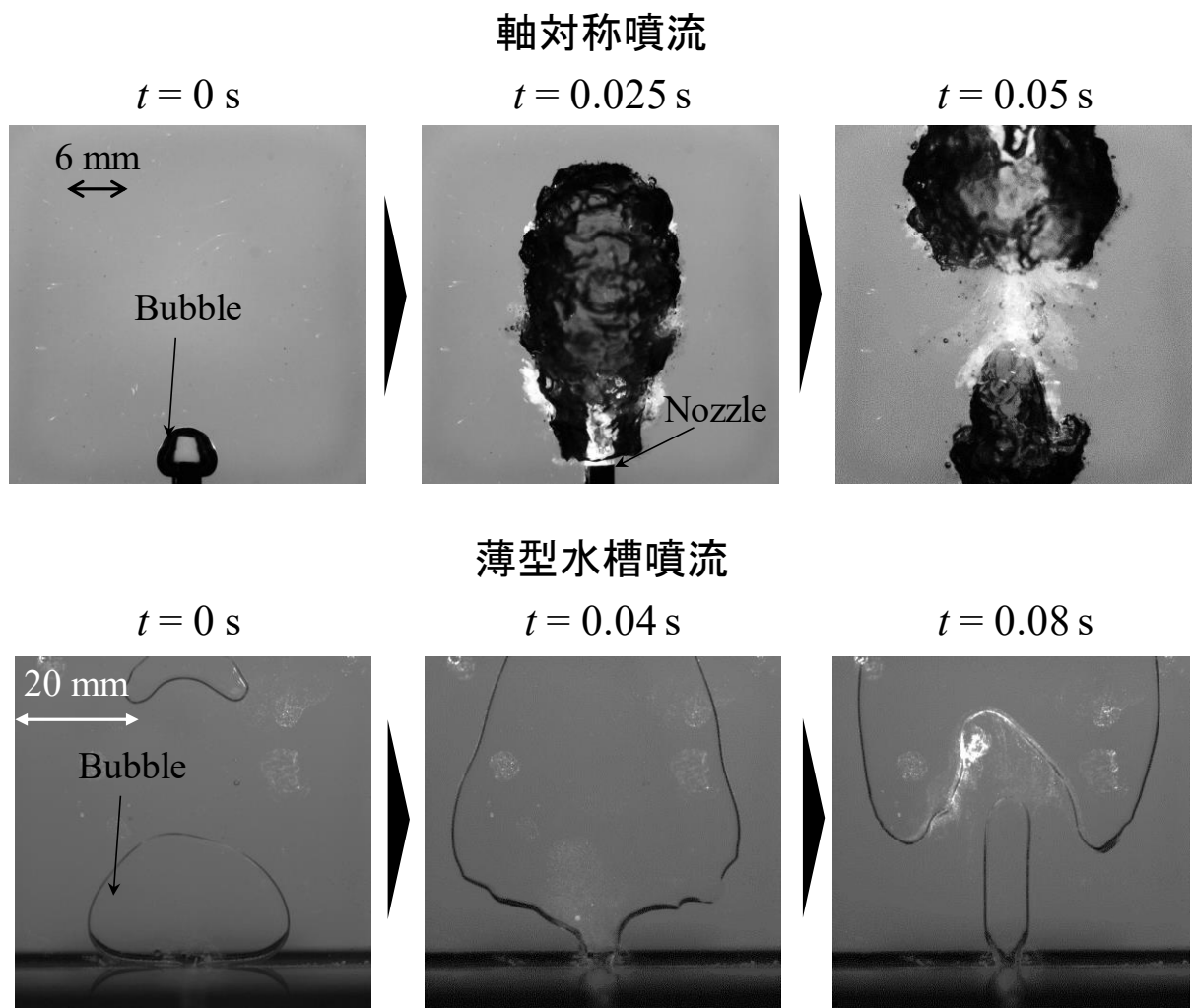


図 5-59 軸対称噴流と薄型水槽噴流の比較結果

5.5.19. エアロゾル計測器を用いた DF 評価

本章では、プールスクラビングによるエアロゾル粒子除去量を実際にプールスクラビング前後でエアロゾル個数濃度、粒径を計測することで評価を行った結果を示す。CsI および CsOH は、原子力発電所の重大事故でエアロゾルとして放出される主要な放射性物質である。しかし、これらの物質は可溶性であり、潮解性であり、水中で粒径の変化が示唆され、プールスクラビング前後における粒径分布の変化が懸念される。そのため、可溶性粒子を用いて測定を行うことは困難であるため、第 1 段階として、プールスクラビング研究にて一般的に使用されている硫酸バリウムを用いた結果を示す。

5.5.20. スクラビングによる粒径分布変化

実験を行っている上で試験部の残留してしまうエアロゾルがあり、初期のエアロゾル濃度を考慮する必要がある。そこで、実験前に試験部大気のエアロゾル濃度の計測を行い、それを計測したものから差分を取ることで現象によって放出されたエアロゾルの濃度の計測を行う。

エアロゾル計測器を用いてプールスクラビングの有無によるエアロゾルの粒径分布を図 5-60 に示す。使用した粒子は不溶性、代表径 0.4 μm の不溶性の硫酸バリウムであり、計測時間は 60 秒で行った。エアロゾル発生機の性質上、濃度を一定に放出できない問題がある。そこで、計測時間を伸ばすこととした。しかし、希釈器を使用せず、高濃度でエアロゾルを放出しており、過度な長時間の計測はエアロゾル計測器の計測部にエアロゾル粒子が溜まり計測に支障が出ることで懸念される。そこで、計測時間は 60 s とした。今後は、計測時間の見直しも必要であると考えられる。サブマージェンスは 100, 300, 500, 700, 900 mm の条件で行った。

赤色のプロットがプールスクラビング前の配管、青色のプロットがプールスクラビングの行われた後の水面から 300 mm 上部での計測結果である。縦軸が粒子の個数、横軸が粒径である。

計測結果から大部分の大粒径のエアロゾル粒子がプールスクラビングにより除去されることを確認した。また、除去量は、サブマージェンスに依存する事を確認した。サブマージェンス 100 mm の条件では、プールスクラビング後において大粒径のエアロゾル粒子が発生していることが確認できる。サブマージェンスが低いため、ジェットを形成せず、エントレインメント現象によって生成した液滴がエアロゾル粒子と共に計測されている可能性に加え、プールを通過する際に粒子が粒子の凝集する可能性が示唆された。これは、プール中のエアロゾル粒子がブラウン運動による拡散や流れにより、粒子同士は衝突する。ことが要因であると考えられる。粒子間に相対的な速度差が生じることにより、粒子同士は衝突する。その際に、粒子間に作用する引力が十分に大きければ、粒子同士は凝集することが知られている^[27]。

また、プール通過前が通過後に比べ小粒径のエアロゾル粒子が多い条件があることは、エアロゾル発生機により生成された凝集していた大粒径エアロゾル粒子が複雑な流動により微細化したことが要因であると考えられる。更に、サブマージェンス 300, 900 mm 条件でエアロゾル粒径分布が他条件と異なる要因として、エアロゾル発生機の濃度が一定に発生できないことが要因であると考えられる。エアロゾル発生機にエアロゾル粒子を充填する際に、かさ密度を一定にできないため、発生に濃度差が現れ、また粒径分布の変化が発生すると考える。

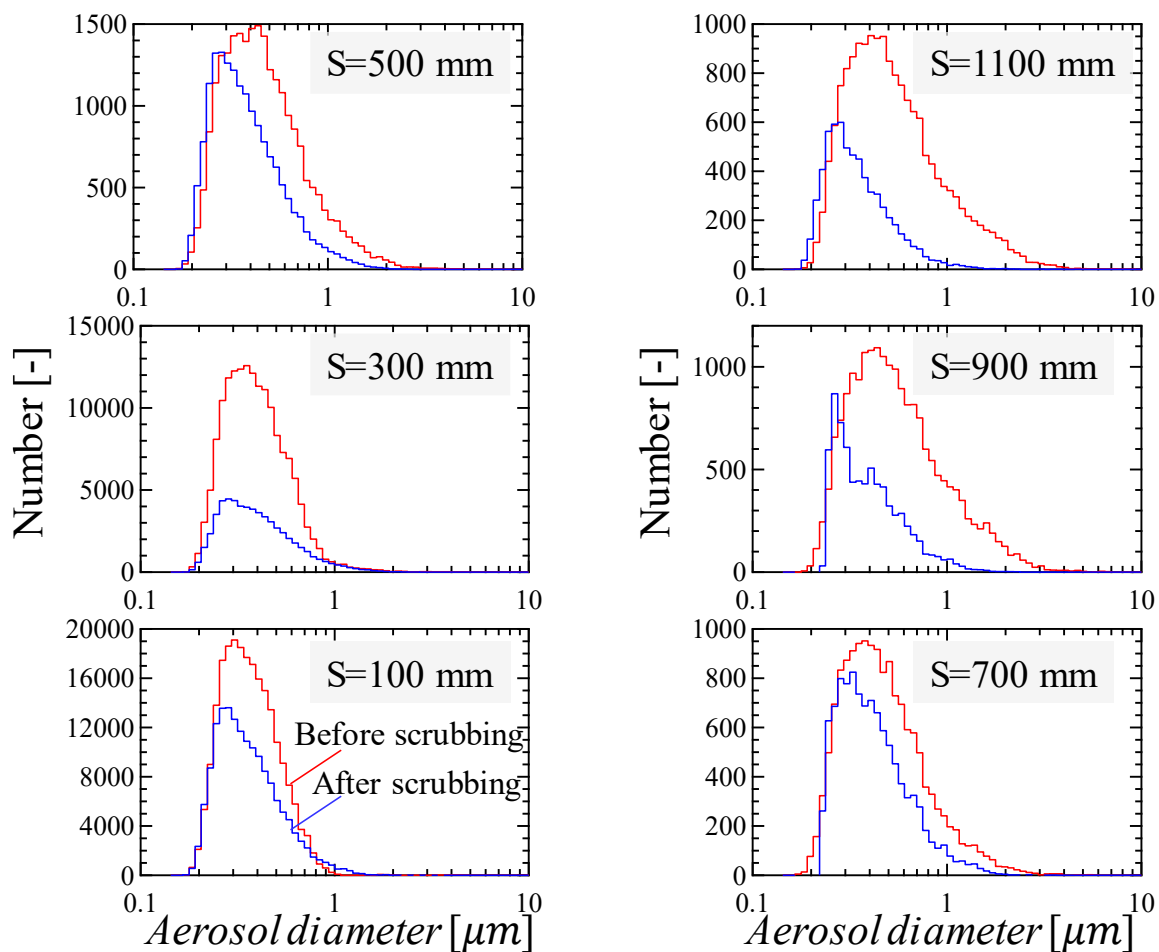


図 5-60 不溶性粒子を用いたスクラビング前後のエアロゾル粒径分布

図 5-61 にサブマージェンス通過によるエアロゾル粒子の粒径分布変化の結果を示す。粒径分布を確認するために、縦軸には個数を全体量で除いたものを使用し、各エアロゾル粒子径の全体に対するその粒子の割合を示す。その結果、プールを通過することによって粒径分布は大きく異なり、大粒径の大半が除去されることを確認した。また、サブマージェンスの増加に伴い小粒径の割合が増加することを確認した。これは、慣性衝突による移行が大きく関わっていると考える。

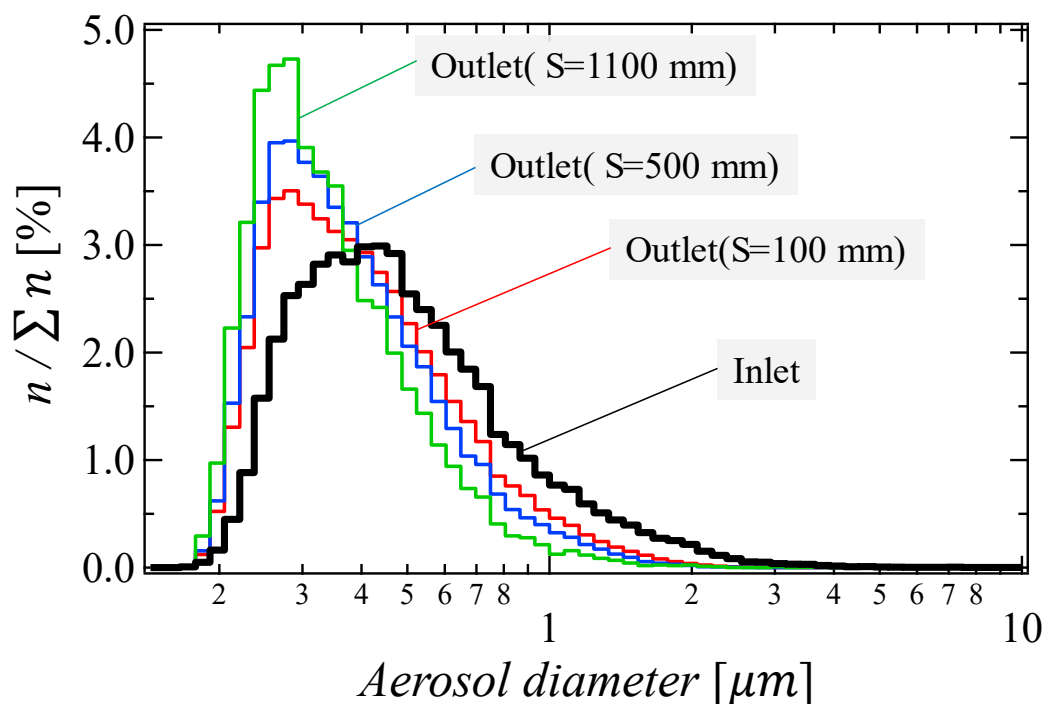


図 5-61 サブマージェンスによるエアロゾル除去量

プールスクラビングによる粒子の除染量の評価を行った結果を図 5-62 に示す。縦軸は除去量、横軸は粒径である。除去量は以下の式で評価を行う。

$$\text{減少率 [\%]} = \frac{\text{スクラビング前} - \text{スクラビング後}}{\text{スクラビング前}} \times 100 \quad (5-33)$$

その結果、エアロゾル粒径が $1.0 \mu\text{m}$ 以上の粒子は約 8 割程度の除去が確認され、更に $1.0 \mu\text{m}$ 以上の大粒径はほぼ 100 %の除去が確認された。更に、エアロゾル粒子の粒径が増加するに伴い除去量も増加することを確認した。これにより、プールスクラビングによる除染が有効であることが確認された^[28]。また、除去量が負の値を示す要因として、前に挙げたエントレインメント現象によって生成した液滴がエアロゾル粒子と共に計測されている事に加え、プールを通過する際に粒子が凝集しているため発生していると考えられる。

更に、プールスクラビングによるサブマージェンスごとにおける水面挙動の可視化を行った結果を図 5-63 に示す。その結果、低いサブマージェンスではエアロゾルが水面を貫通していることが確認でき、サブマージェンスが上がるに連れてジェットが形成されることが確認できた。また、エアロゾルがジェットを形成することなく大気に放出される場合、MELCOR において考えられている流動構造に当てはまらないことが確認できた。よって、バルブを開放しベントを開始した直後、プール水が沸騰し低いサブマージェンスでの条件においては、MELCOR にて考えられている流動構造を形成しないことが示唆された。

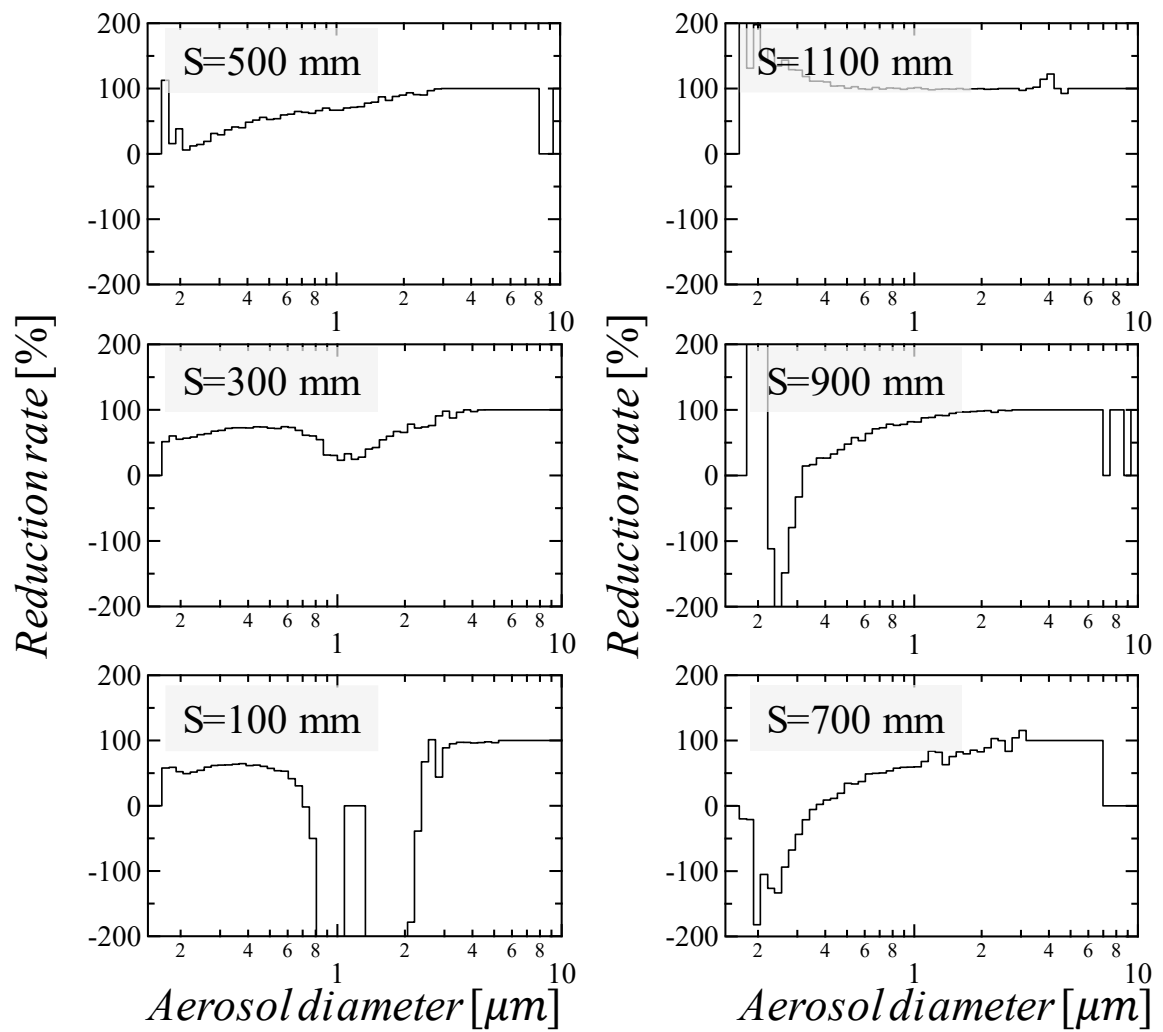


図 5-62 不溶性粒子を用いた条件におけるスクラビング前後の粒子減少率

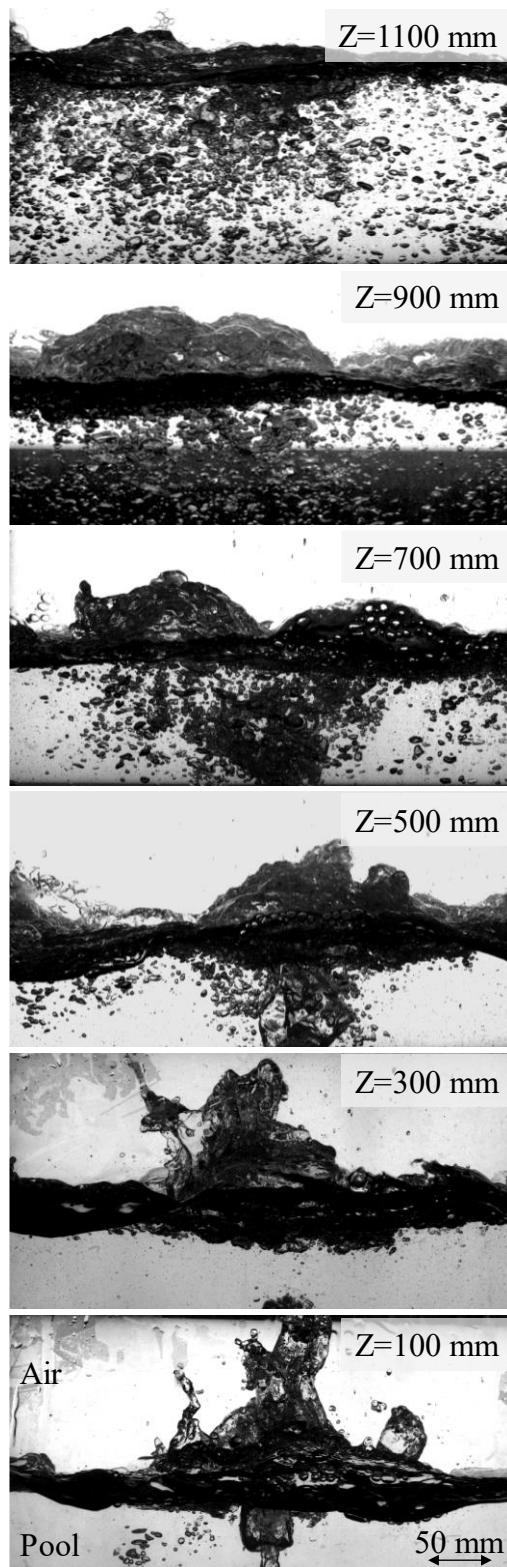


図 5-63 各サブマージェンスにおける水面可視化結果水・蒸気系における慣性衝突による除染係数評価

5.5.21. プール全領域における DF_{OV_i} 評価

グローブール領域からスウォーム上昇領域、気泡崩壊領域まで MELCOR において考えられている領域を通過したことによるプールスクラビングにおける全ての除染要因を考慮した DF_{OV_i} を計測した結果と、原子力規制庁から無償貸与を受ける解析コード (MELCOR) を用いたプールスクラビング効果による除染効果 (DF) 評価との比較結果を示す。

5.5.22. プール全領域における DF_{OV_i} の算出

MELCOR では、プールスクラビングによるエアロゾル粒子の除去量をプール通過前後のエアロゾル総質量から算出している。そのため、実験により計測されたエアロゾルの粒径を用いて以下の式から DF の算出を行った。

$$DF = \frac{M_{in}}{M_{out}} \quad (5-34)$$
$$M = \sum_{i=0}^n \rho \frac{\pi d_i^3}{6} \times N_{d_i}$$

M_{in} : 入口総質量, M_{out} : 出口総質量, d_i : エアロゾル粒径, N_{d_i} : 粒子個数, ρ : 粒子密度, n : 区分数(118)

加えて、個数濃度を用いて以下の式から DF の算出を行った。

$$DF = \frac{N_{in}}{N_{out}} \quad (5-35)$$
$$N = \sum_{i=0}^n N_i$$

N_{in} : 入口総個数, N_{out} : 出口総個数

計測されたエアロゾル総質量、総数をそれぞれ用いて算出した DF と MELCOR により計算された DF の結果を図 5-64 に示す。縦軸はプール通過による総除染量である DF、横軸はサブマージェンスである。四角のプロットが総質量を用いて算出した DF、丸いプロットが総数を用いて算出した DF の結果である。その結果、総質量、総質量どちらの条件においても同様の傾向であるものの総数を用いた場合は、総質量を用いた条件に比べ低い値を示した。これは、プールスクラビングにより大粒径のエアロゾル粒子が除去されることが確認でき、大粒径の影響が大きく出ていることが要因であると考えられる。加えて、MELCOR によって計算された DF と、実験により算出された DF はサブマージェンスの増加に伴い DF は指数的に増加する同様の分布の傾向を示し、総質量を用いた場合は、MELCOR は過小評価、総数を用いた場合は過大評価していることが確認できる。

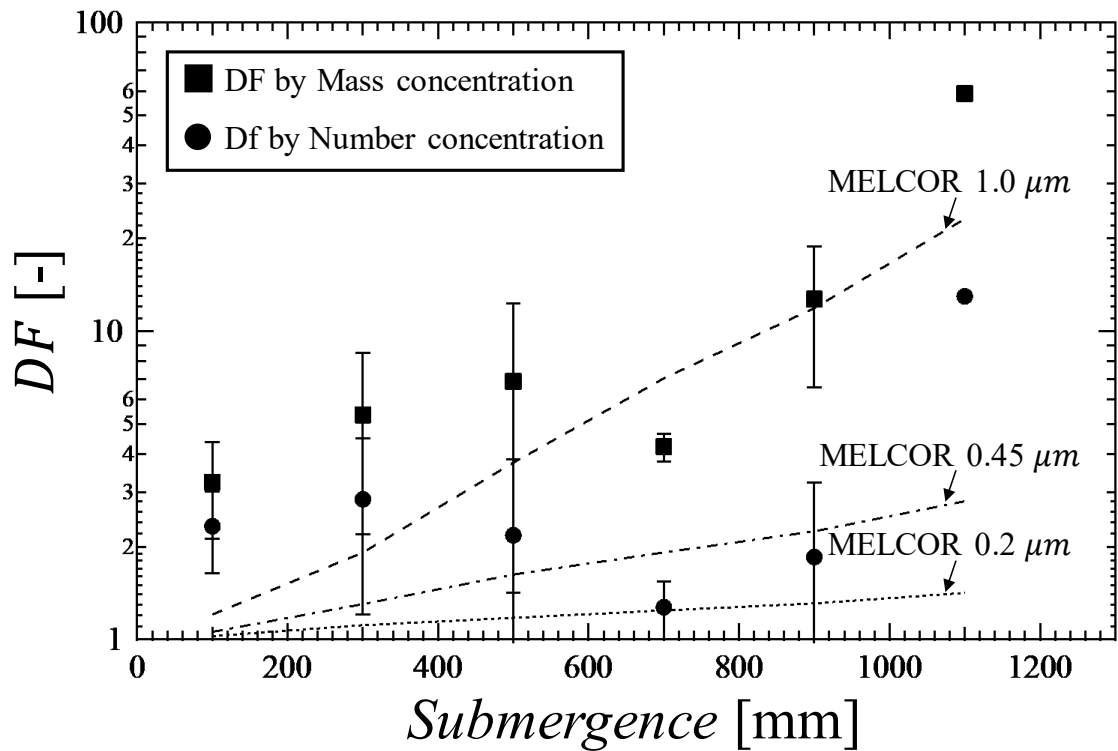


図 5-64 DF 計測結果

図 5-65 に実際にエアロゾル計測器を用いて算出した、各種粒径に対する DF_{OVi} を示す。エアロゾル粒子には不溶性の硫酸バリウムを用いた。黒色のプロットが実験値の総質量を用いて算出した DF であり、赤色のプロットが MELCOR によって計算された DF_{OVi} である。

MELCOR においては、低いサブマーゼンス条件の 100 mm では小粒径のエアロゾル粒子が MELCOR に比べ多く除去できていることが確認できた。

サブマーゼンス 100 mm 以上の高いサブマーゼンスの条件では、粒径に対し DF_{OVi} は指数的に上昇していくことが確認でき、MELCOR により計算された値は実験値と良好な一致を示すことが確認できた。この分布の傾向は、JAEA にて行われている既存研究^[26]と同様の傾向を示した。

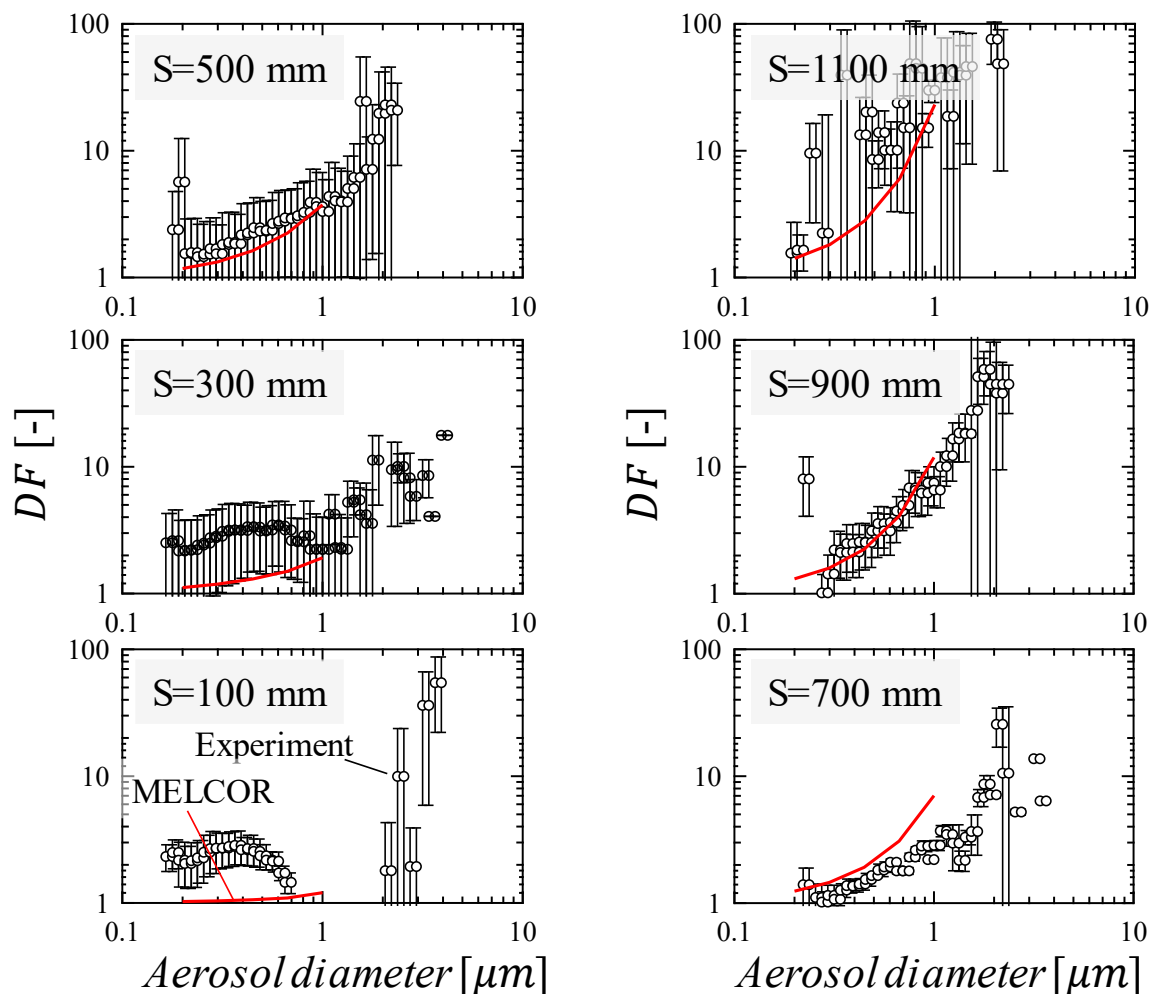


図 5-65 不溶性粒子を用いた条件における各粒径における $DF_{OV,i}$ 評価

5.5.23. サブマージェンスに対する $DF_{OV,i}$

図 5-66 に実際にエアロゾル計測器を用いて算出した、エアロゾル粒子に不溶性の硫酸バリウムを用いた条件における、各サブマージェンスに対する $DF_{OV,i}$ を示す。

実験値と MELCOR はサブマージェンスの増加に伴い、DF も指数的に増加する同様の傾向を示し、オーダーも一致していることが確認できる。しかし、MELCOR では現象を安全側に評価していることが確認された。

さらに、既存研究の高流量実験の POSEIDON-II^[30]と比較した結果、本実験と DF に大きな差が生じないことを確認した。そのため、DF に対して流量の影響は大きくないことを確認した。

丸のエアロゾル粒子代表径が大きい既存研究の PECA 実験^[31]と比較した結果、DF は大きな差が生じることを確認した。そのため、DF に流量の影響は少なく、エアロゾル粒子の粒径、サブマージェンスが支配的であることを示した。

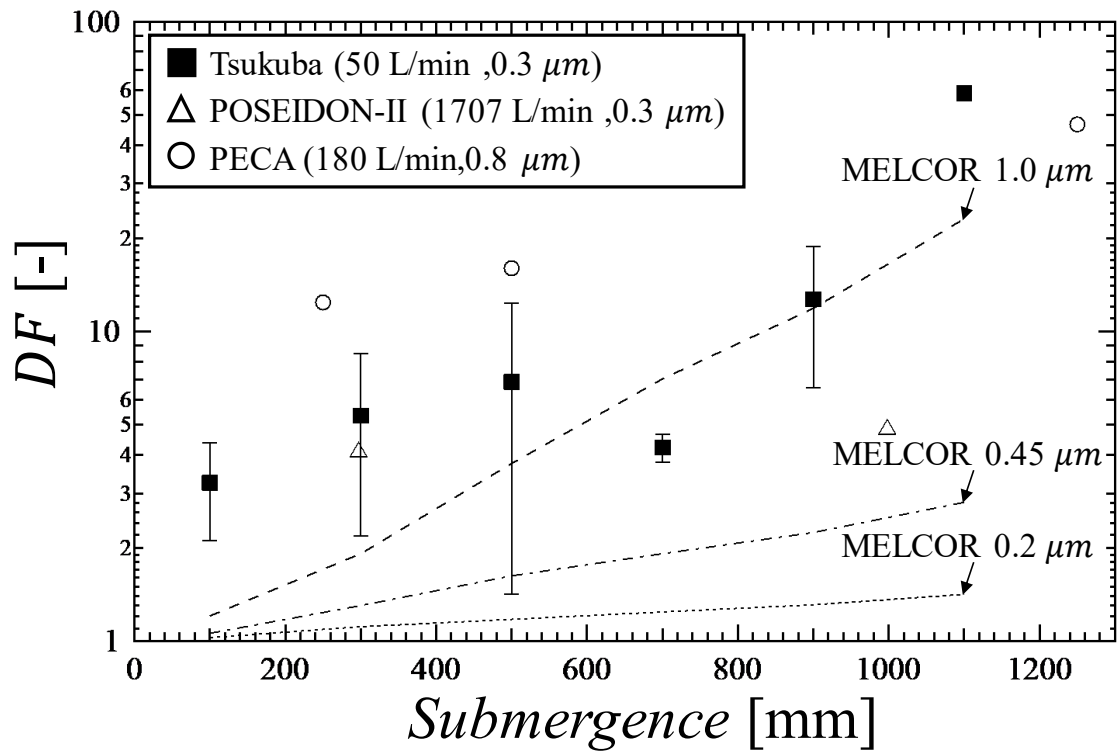


図 5-66 不溶性エアロゾルを用いた条件におけるサブマージェンスに対する $DF_{Ox,i}$ 評価結果

5.6. 気泡の二相流挙動評価実験に関するまとめ

エアロゾルを含まない二相流実験では蒸気凝縮を伴う気相噴流の挙動およびその影響に焦点を当て実験を実施した。可視化結果からは収縮を伴う蒸気凝縮挙動により気相噴流がより微細化する可能性が示唆された。そこで WMS による気泡径計測を行い、より詳細な気泡径データ分析手法の構築を試みるとともにその分析手法を用いた評価を行った。分析手法として混合ガウスモデルと呼ばれる確率密度関数を用いたデータクラスタリングを導入した。WMS により計測した気泡径データを大気泡成分および小気泡成分にクラスタリングし、それぞれの成分ごとに体積平均径を算出した。さらに気泡径の減少率を比較することで各条件における蒸気凝縮が噴流の微細化に及ぼす影響を評価した。その結果、低サブクール度条件では蒸気凝縮挙動が比較的穏やかになり噴流分裂への影響が小さくなると考えられる。さらに高空気流量では噴流に占める蒸気の割合が低くなり結果的に蒸気凝縮の影響が噴流分裂に対して現れにくくなると考えられる。小気泡成分と大気泡成分との間で減少率を比較すると、すべての条件において大気泡成分の方が大きく推移している。このことから小気泡成分に比べて大気泡成分の方が凝縮による影響を受け易いと考えられる。蒸気凝縮がプールスクラビングによる除染効果を向上させる要因の一つが微細化していない大気泡の分裂を促進するためである可能性が示唆された。

温度成層化についての実験ではノズル上側での温度成層の形成は確認されなかった。また、水槽内の温度上昇挙動からノズルの噴射方向に対する温度上昇の依存性があると考えられる。

エアロゾルを含む二相流実験では、エアロゾルの性質により流動に与える影響、不溶性エアロゾルを用いた DF の計測に焦点を当て実験を実施した。その結果、流動構造は、エアロゾル粒子の有無によって変化する場合があることが示された。実験値のスウォーム速度と MELCOR で定義されている値はオーダーが等しく、分布は同様の傾向を示すことが確認された。また、ノズル近傍のスウォーム速度は MELCOR では過小評価をしていることが示唆された一方、下流の領域においては実験値と良好な一致を確認され、計測された気泡径分布は MELCOR における仮定と異なることが示された。

薄型水槽を用いて水-空気条件における慣性衝突による気泡内の詳細な移行挙動の可視化に成功した。PIV により速度場の算出を行いベント管出口速度がノズル近傍における慣性衝突による移行の $DF_{T,i}$ に支配的であると確認された。さらに、水-蒸気条件における慣性衝突に加え、蒸気凝縮による気泡内の詳細な移行挙動の可視化に成功した。また、PIV により速度場の算出を行い、凝縮による速度場評価をした。凝縮に伴う急速な速度場が確認され、その際に殆どのエアロゾル粒子が液相側へ移行する挙動が確認された。

エアロゾル粒子に不溶性の硫酸バリウムを用いた条件において、スクラビング前後の粒径分布の算出、個数濃度、質量濃度からそれぞれ $DF_{Ov,i}$ の算出を行うことができた。その結果、プールスクラビング効果によりエアロゾル粒子が大粒径であるほど除去できることを確認された。サブマージェンスに対する DF 結果から MELCOR は実現象を過小評価していることが示された。

6. MELCOR による DF 解析

本項目では、原子力規制庁から無償貸与を受ける解析コード (MELCOR) を用いて、プールスクラビング効果による除染効果 (DF) 評価を実施し、結果を分析した。なお、解析ケースは代表的な試験条件で 5 ケース程度とした。解析を実施する試験条件は表 6-3 で明示した。

本二相流実験装置において実施した DF 計測に対応する MELCOR 解析は 5.5.19~5.5.23 項に示したように 6 ケース実施し、比較検討を行った。本二相流実験装置での実験では、ガス流量や蒸気割合をパラメータとした各種物理量の計測、およびサブマージェンスをパラメータとした DF 計測が行われているが、サブマージェンスに加えてガス流量や蒸気割合をパラメータとし、粒径ごとの DF を実験的に調べた研究として、Hakii らの研究がある。そこで、本二相流実験装置の実験パラメータ範囲を広げ、サブマージェンス、ガス流量、蒸気割合などが及ぼす DF への影響を検討するため、まず、MELCOR でそれらのパラメータが計算できるか妥当性を確認するべく、Hakii らの実験結果と MELCOR による解析結果の比較を行った。

6.1. プールスクラビングによる DF 解析の概要

MELCOR においてプールスクラビング時に対象となる DF の種類を把握する。

除染対象となる気中のエアロゾル粒子は、図 6-1 に示すように、径の違いによる質量分布を持つものとして扱われる。このため、プールスクラビングによる全体の除染係数である $DF_{OV,part}$ は次式から求まる。

$$DF_{OV,part} = \frac{\sum_{i=1}^{NBINS} \dot{m}_{part,i}}{\sum_{i=1}^{NBINS} \left(\frac{\dot{m}_{part,i}}{DF_{OV,i}} \right)} \quad (6-1)$$

また、 $DF_{OV,i}$ はベント管出口領域においては拡散泳動および蒸気の蒸発・凝縮による DF_{EC} 、慣性衝突による $DF_{II,i}$ 、遠心拡散・重力沈降による $DF_{ER,i}$ およびスウォーム流上昇領域においては遠心拡散およびブラウン拡散による $DF_{SR,i}$ により求まる。この詳細については 6.2 および 6.3 にて後述する。

$$DF_{OV,i} = DF_{EC} \times DF_{II,i} \times DF_{ER,i} \times DF_{SR,i} \quad (6-2)$$

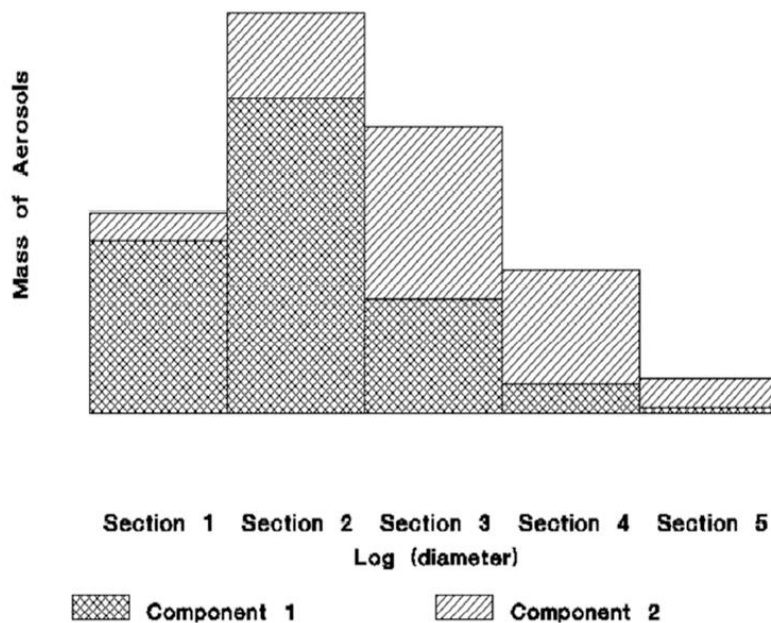


図 6-1 エアロゾルの質量分布 [MELCOR Computer code manuals (1.8.5)]

6.2. プールスクラビングに関する流動モデル概要

CVH パッケージ内に記述される流動モデルについて調査を実施した。

MELCOR における流動モデルは SPARC-90 のものをクローニングしたものであると記述があり、SPARC-90 における流動モデルは図 6-2 である。放射性物質を含む汚染ガスはベント管出口から放出され、まずグローブを形成する。このグローブは小さな気泡にすぐさま分裂し、気泡群を構成しスウォーム流として上昇する。スウォーム流中の気泡は水面に達すると破裂し、エントレインメント液滴が発生する。

スウォーム流は同一の寸法形状の気泡により構成されるものと扱われており、この気泡モデルは図 6-3 の通りである。気泡は長軸および短軸を持つ楕円体として扱われる。

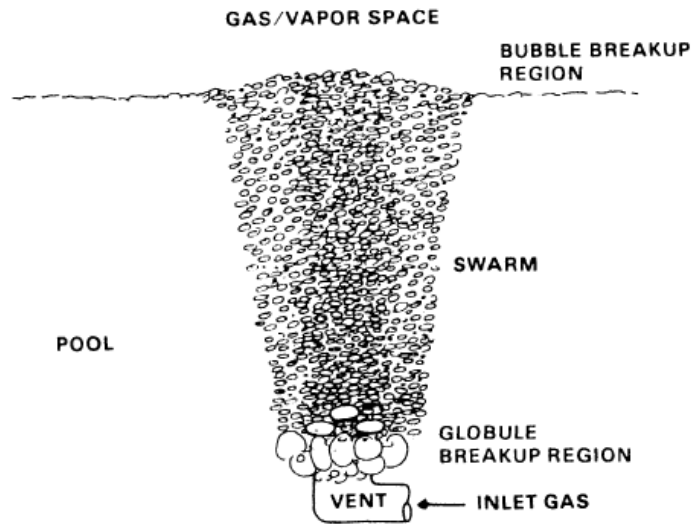


図 6-2 SPARC-90 における流動モデル

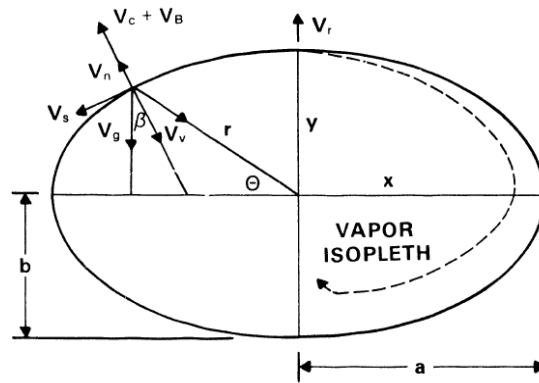


図 6-3 SPARC-90 における気泡モデル

6.3. プールスクラビングに係る除染モデル概要

プールスクラビングにおける除染モデルは、流動モデルのベント管出口領域、スウォーム流上昇領域それぞれに対して図 6-4 のように考慮されている。

ベント管出口領域においては拡散泳動および蒸気の蒸発・凝縮による DF_{EC} 、慣性衝突による $DF_{II,i}$ 、遠心拡散・重力沈降による $DF_{ER,i}$ が考慮され、スウォーム流上昇領域においては遠心拡散およびブラウン拡散による $DF_{SR,i}$ が考慮されている。なお、水面における気泡崩壊領域で本来発生するエントレインメント液滴については、その量がプール全体の量と比較して微小であるため DF に係らないものとして無視されている。

また、本解析では、MELCOR から出力結果として取得できる DF とは別に、エアロゾルの質量流量から DF の算出を試み、 DF の定義通りに、エアロゾルの除染効果がエアロゾルの環境中に放出される質量として表現されているかの確認を行うことで、MELCOR から出力される DF の検証を行った。質量流量から求めた除染係数は、プール部水中への流入したエアロゾル質量流量を、プール部から流出したエアロゾル質量流量で除すことで算出することができる。

$$DF = \frac{\text{プール部水中への流入量}}{\text{プール部からの流出量}} = \frac{G_1}{G_3} = \frac{\frac{d}{dt}(M_1 + M_2 + M_3)}{\frac{d}{dt}(M_3)} \quad (6-3)$$

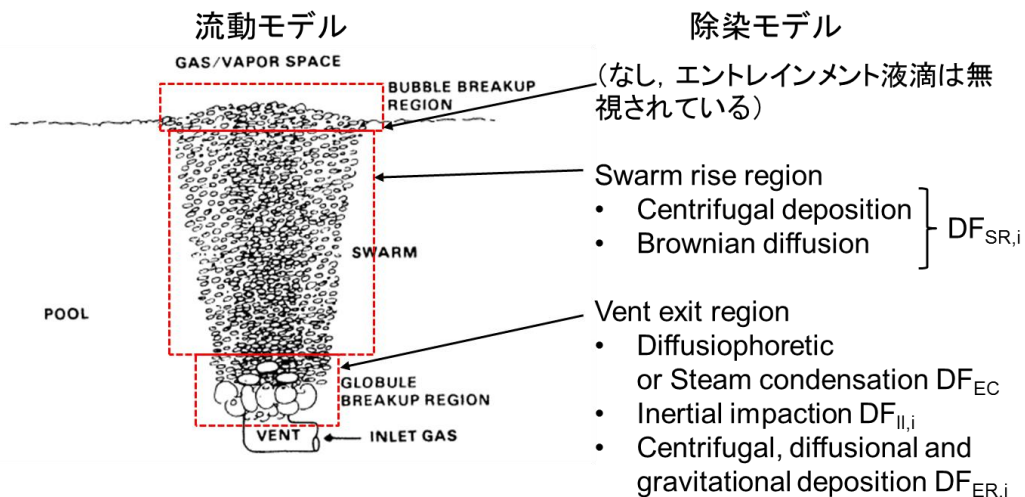


図 6-4 SPARC-90 における除染モデル

6.4. 解析体系および解析条件

Hakii ら^[32]はプールスクラビング効果をノズル径やサブマージェンス、蒸気割合、流量などをパラメータとして、実験的に調べた。その実験結果と MELCOR で得られた結果を比較することで、MELCOR が実験結果を再現できるのかを調べることにした。

図 6-5 に解析体系を示す。体系はタンク部、プール部、環境の三つのコントロールボリューム領域とこれらをつなぐフローパスにより構成されている。解析体系の主要なパラメータの入力値、および本年度、筑波大学にて行った DF 計測実験の試験パラメータを表 6-1 に示す。表からは、Hakii らの実験条件は筑波大学における実験と近い温度条件や粒子条件であるものの、蒸気割合やサブマージェンスなどは筑波大学の実験を含める形で、より広範な条件での検討がなされていることが示された。本解析におけるエアロゾルに関する入力値は表 6-2 に示す。解析体系の寸法および流体に関するパラメータは、既存研究で行われた実験(Hakii et al. 1990)を参考にし決定した。タンク部、プール部、環境は、次のようなコンセプトで構成した。格納容器のように体積が大きく圧力が高まったタンクから、エアロゾルを含む気相が、プール部へ放出され、最終的には施設外を模擬した環境へ放出される。ただしプール部に関しては、解析と実験の結果を比較しやすくするため、Hakii らの試験部の形状寸法を設定した。プール部におけるエアロゾルの噴出口となるノズル部は、プール部中央底面から突き出す形を想定しており、その長さはプール底面から 1000 mm とした。プール部には水を、タンク部には空気あるいは、窒素、窒素と蒸気の混合気体を配置した。MELCOR の入力ファイルの都合上、速度条件を入力する必要があったことから、ノズル部での流速は一定値とした。気相に混じって流れるエアロゾルはセシウムとし、崩壊熱は 0.0 W として熱の発生はないものとした。パラメータとしたエアロゾル径は、サブミクロンから数マイクロのオーダーとした。エアロゾル径分布は 0.2~1.0 μm を 5 区間に分けて設定した。プール部の詳細な条件や流動条件は表 6-3 に示す。

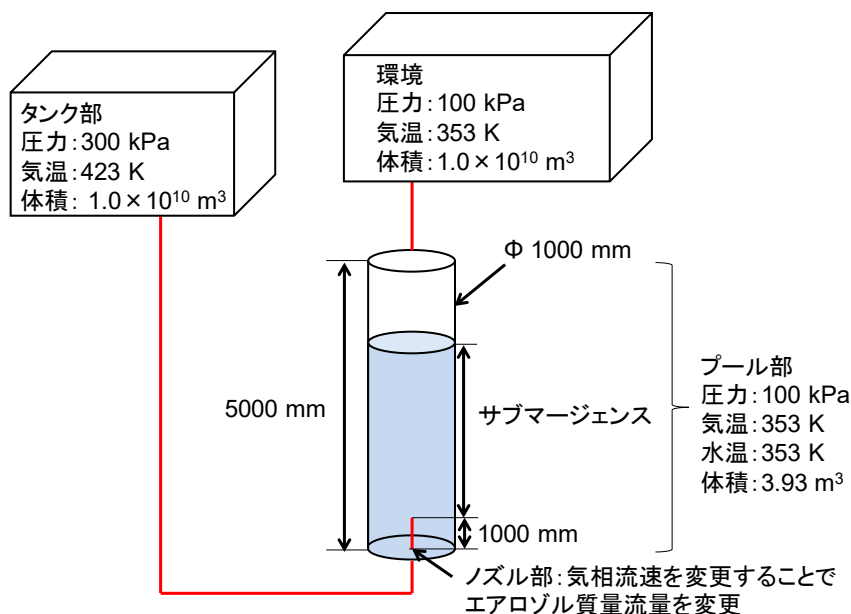


図 6-5 解析体系

表 6-1 解析体系の主要なパラメータの入力値

		昨年度までの 計算条件	筑波大学の DF計測条件	本発表の 計算条件	Hakii et al. (1990)
寸法	ノズル径 [mm]	3, 6, 10	6	150	10 ~ 150
	サブマージェンス [m]	0 ~ 0.9	0 ~ 1.1	0.5, 1.6, 2.7, 3.8	0 ~ 3.8
	プール部断面積 [m ²]	0.09	0.25	0.785	0.785
	プール部高さ [m]	1.84	3.0	5.0	5.0
流体	プール水温 [°C]	27 ~ 90	20	80	20 ~ 110
	キャリアガス温度 [°C]	27 ~ 100	20	150	20 ~ 300
	蒸気割合 [vol.%]	0, 50	0	0, 30, 50, 80	0 ~ 80
	キャリアガス流量 [L/min]	0.0042 ~ 0.42	50	300, 500, 1000	300 ~ 2000
エアロ ゾル	粒子径 [μm]	1.0 ~ 2.0	0.2~1.0	0.2 ~ 1.0	0.2 ~ 1.0
	材質	Cs	BaSO ₄	Cs	LATEX, Csl

表 6-2 エアロゾルの入力値

核種	Cs
粒径 [μm]	1.0~2.0
粒径分布	一様分布
初期インベントリ [kg]	0.2(タンク部のみ)
崩壊熱 [W]	0.0

表 6-3 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 ³]	[m ³]	[μm]	[K]	[m ²]	
No. 1	No. 32	筑波大学の 実験と比較	空気-水	0	6	29.5	50	100	86400	10 ¹⁰	0.7	1	0.2-1.0	300	0.25
No. 2	No. 33	筑波大学の 実験と比較	空気-水	0	6	29.5	50	300	86400	10 ¹⁰	0.65	1	0.2-1.0	300	0.25
No. 3	No. 34	筑波大学の 実験と比較	空気-水	0	6	29.5	50	500	86400	10 ¹⁰	0.6	1	0.2-1.0	300	0.25
No. 4	No. 35	筑波大学の 実験と比較	空気-水	0	6	29.5	50	700	86400	10 ¹⁰	0.55	1	0.2-1.0	300	0.25
No. 5	No. 36	筑波大学の 実験と比較	空気-水	0	6	29.5	50	900	86400	10 ¹⁰	0.5	1	0.2-1.0	300	0.25
No. 6	No. 37	筑波大学の 実験と比較	空気-水	0	6	29.5	50	1100	86400	10 ¹⁰	0.45	1	0.2-1.0	300	0.25
No. 7	No. 38	ガス流量の 影響	空気-水	0	150	0.283	300	2700	86400	10 ¹⁰	0.942	1	0.2-1.0	353	0.785
No. 8	No. 39	ガス流量の 影響	空気-水	0	150	0.472	500	2700	86400	10 ¹⁰	0.942	1	0.2-1.0	353	0.785
No. 9	No. 40	ガス流量の 影響	空気-水	0	150	0.943	1000	2700	86400	10 ¹⁰	0.942	1	0.2-1.0	353	0.785
No. 10	No. 41	蒸気割合の 影響	蒸気- 窒素-水	30	150	0.472	500	2700	86400	10 ¹⁰	0.942	1	0.2-1.0	353	0.785
No. 11	No. 42	蒸気割合の 影響	蒸気- 窒素-水	50	150	0.472	500	2700	86400	10 ¹⁰	0.942	1	0.2-1.0	353	0.785
No. 12	No. 43	蒸気割合の 影響	蒸気- 窒素-水	80	150	0.472	500	2700	86400	10 ¹⁰	0.942	1	0.2-1.0	353	0.785
No. 13	No. 44	サブマージェン スの影響	蒸気- 窒素-水	50	150	0.472	500	500	86400	10 ¹⁰	0.942	1	0.2-1.0	353	0.785
No. 14	No. 45	サブマージェン スの影響	蒸気- 窒素-水	50	150	0.472	500	1600	86400	10 ¹⁰	0.942	1	0.2-1.0	353	0.785
No. 15	No. 46	サブマージェン スの影響	蒸気- 窒素-水	50	150	0.472	500	3800	86400	10 ¹⁰	0.942	1	0.2-1.0	353	0.785

6.5. Hakii らの実験に対応するプールスクラビング解析

本研究における DF 計測実験に加え、より広範な条件におけるエアロゾル除去効果を検討するため、プールスクラビング効果を実験によって Hakii らによる既存研究と MELCOR で得られた結果を比較する。

表 6-3 の各解析条件のうち、ガス流量の影響について各ボリューム中のエアロゾル質量の結果を図 6-6 に示す。図 6-6 の条件では、蒸気割合を 0、すなわちエアロゾルを含んだ空気単相をプール部へ流入させた。図 6-6(a)より、環境へエアロゾルが放出されており、ガス流量が大きくなるほど、放出される質量は増加した。つぎに、図 6-6(b)より、プール部ガス中に残存するエアロゾル質量はほぼ 0 となった。図 6-6(c)より、どの解析条件においてもプール部水中にエアロゾルが捕集され、ガス流量が大きくなるほど、捕集されるエアロゾル質量は増加した。

図 6-7 に、図 6-6 の条件における各ボリューム間のエアロゾル質量流量を示す。図 6-7 より、それぞれのコントロールボリューム間の質量流量は時間によらず一定となり、ガス流量が大きくなるほど、各位置における質量流量もそれぞれ増加した。

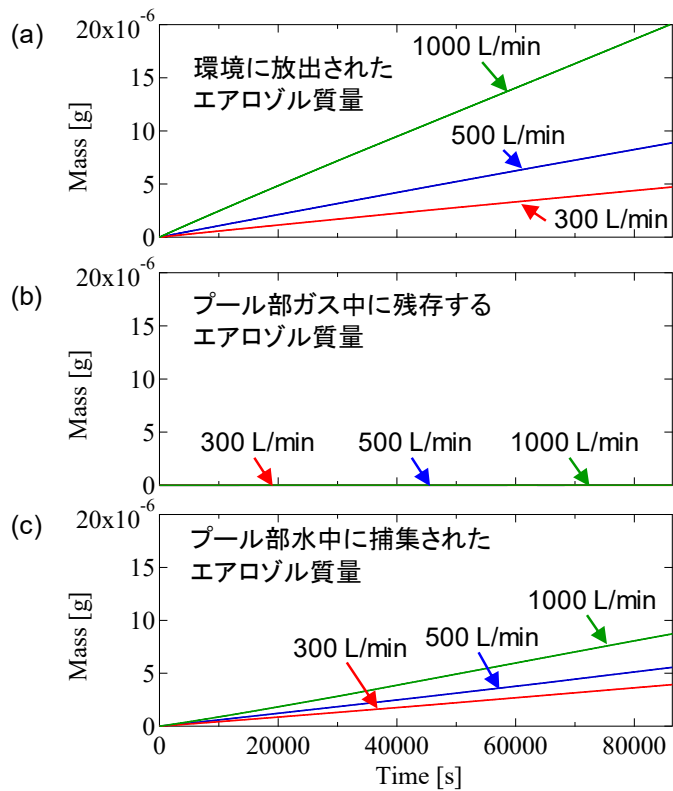


図 6-6 各ボリューム中のエアロゾル質量

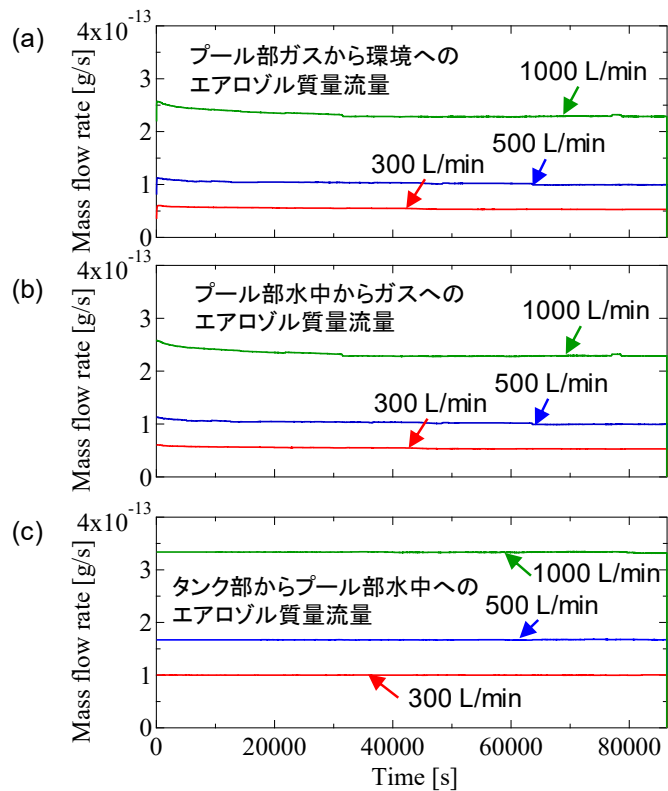


図 6-7 各ボリューム間のエアロゾル質量流量

図 6-8 に質量流量から求めた除染係数と粒子径ごとの DF の解析結果を示す。図 6-8(a)より、質量流量から求めた DF は時間によらず一定となった。図 6-8 (b)より、MELCOR から取得したプール部水中への DF も同様に時間によらず一定となり、また粒子径が大きくなるほど DF も増加した。

図 6-9 にガス流量が及ぼす DF への影響の時系列変化を示す。図 6-9(b)の結果は、粒子径ごとの DF を平均化し求めた DF を示している。図 6-9 より、DF は時間によらず一定となり、ガス流量が大きくなるほど DF は減少する傾向が得られたが、その値は、300 L/min において 1.9 程度であるのに対し 1000 L/min で 1.5 程度とほとんど変化しなかった。質量流量から求めた DF の結果である図 6-9 (a)と MELCOR から出力される DF である図 6-9 (b)を比較すると、いずれのガス流量においても DF はほとんど一致した。

図 6-10 にガス流量が及ぼす DF への影響を既存研究の実験結果と MELCOR で得られた結果とを比較した図を示す。図 6-10 より、実験と MELCOR で得られた結果のいずれも、粒子径が大きくなるほど DF が大きくなった。MELCOR で得られた DF は実験結果よりも 1 オーダーほど小さい結果となり安全側の評価となることがわかった。また、ガス流量が大きくなるほど、実験結果で得られた DF は増加したが、MELCOR では、DF は減少する傾向となった。これは、ノズル近傍では、エアロゾルが慣性衝突により除染が行われるのに対し、MELCOR で評価される慣性衝突による除染への寄与が小さい可能性が考えられる。

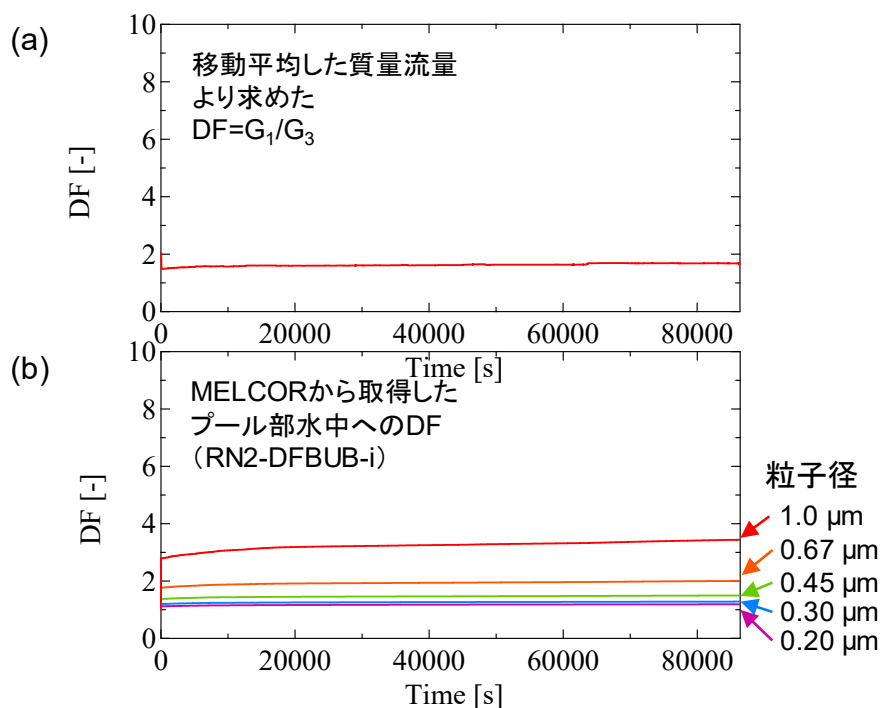


図 6-8 質量流量から求めた除染係数と粒子径ごとの DF の解析結果

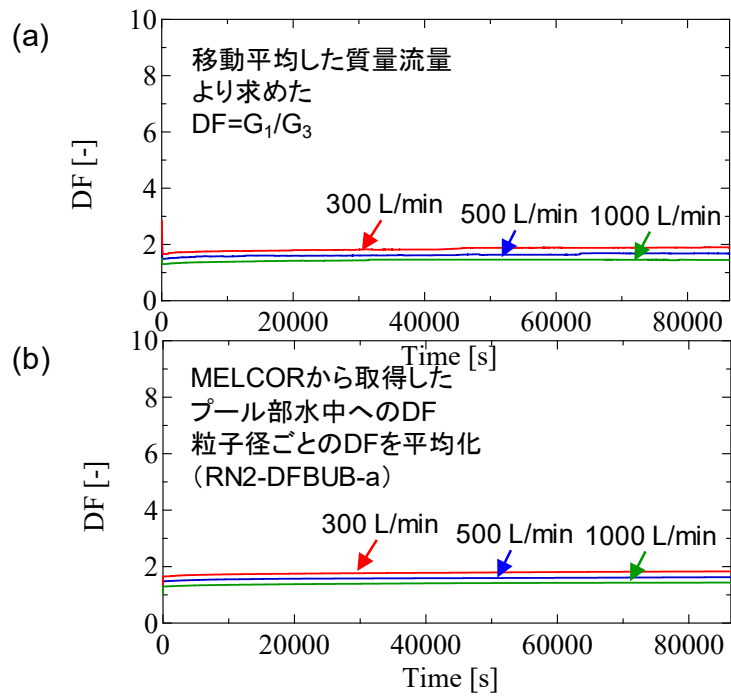


図 6-9 ガス流量が及ぼす DF への影響の時系列変化

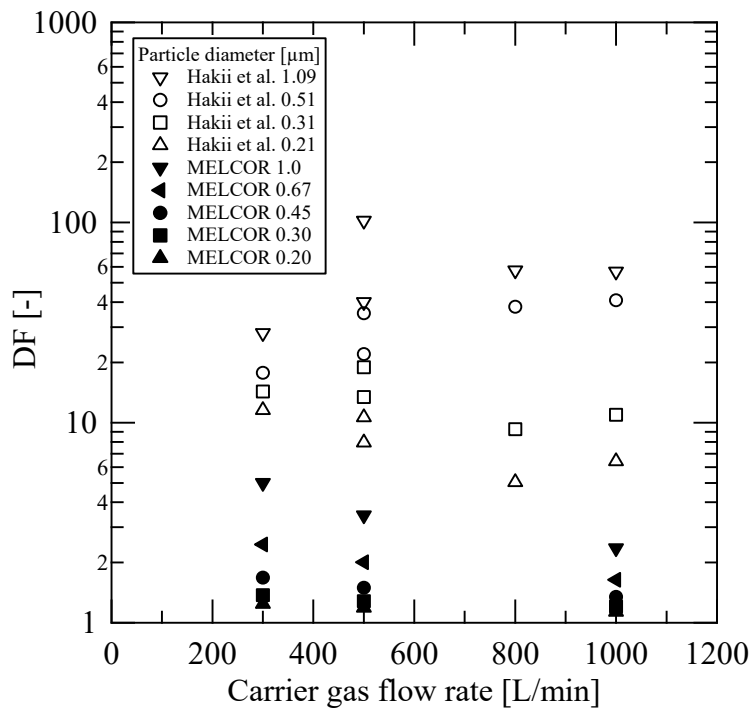


図 6-10 ガス流量が及ぼす DF への影響

図 6-11 にサブマージェンスが及ぼす DF への影響の時系列変化を示す。本条件では、気相蒸気割合を 50%、体積流量 500 L/min として計算を実施した。図 6-11 より、時間によらず、DF は一定値となり、サブマージェンスが高くなるほど、DF が増加した。また、質量流量から求めた DF は MELCOR から取得した DF とほぼ同じ値となった。

図 6-12 にサブマージェンスが及ぼす DF への影響を示す。図 6-12 より、サブマージェンスが高くなるほど、DF が増加した。また、MELCOR で得られた DF は、既存研究で得られた DF よりも 1 オーダー程度低い傾向となり、安全側の評価となった。これは、サブマージェンスの増加はスウォーム上昇領域における気泡の滞留時間の増加を意味し、スウォーム上昇領域における DF の評価が過小評価となっていたことが考えられる。

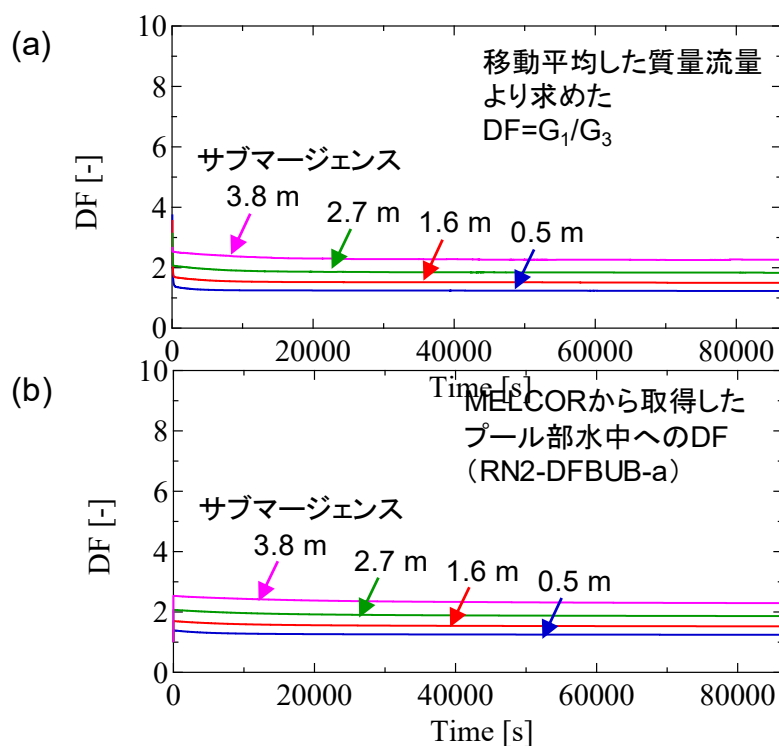


図 6-11 サブマージェンスが及ぼす DF への影響の時系列変化

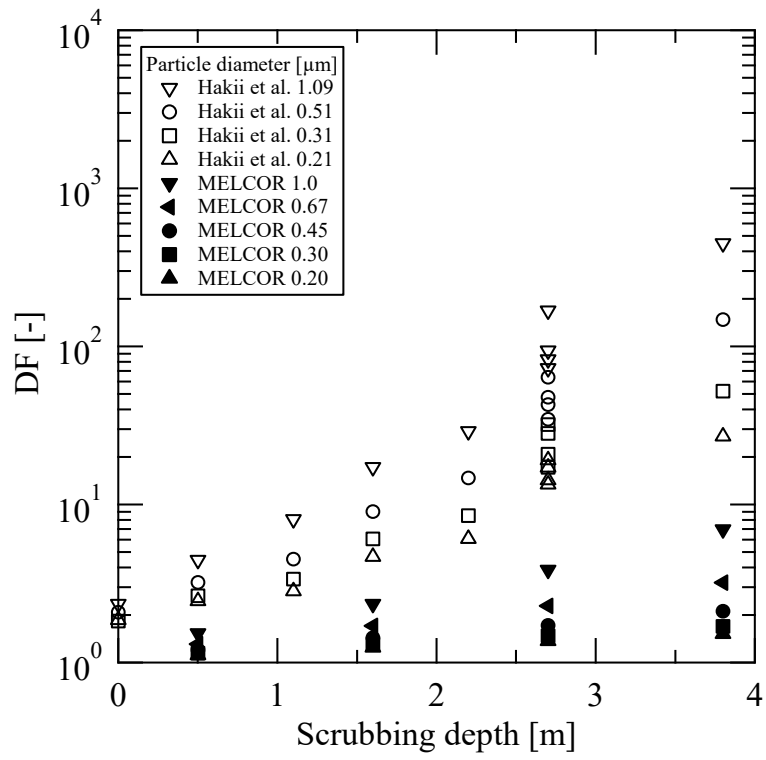


図 6-12 サブマージェンスが及ぼす DF への影響

図 6-13 に気相蒸気割合が及ぼす DF への影響の時系列変化を示す。本条件では、体積流量 500 L/min, サブマージェンスを 2.7 m として計算した。図 6-13(a)と(b)より、気相蒸気割合が 0, 30, 50 %の条件において、DF は時間に依存せず一定となり、気相蒸気割合が 80 %の条件においては、DF が計算開始直後から 10000 秒まで減少しつづけ、その後一定となる傾向が得られた。このときの図 6-13 (c)に示すようにプール水温は増加していたことから、蒸気がプール部に侵入し、プール部の水温が上昇することでサブクール度が小さくなっていき、蒸気が凝縮しづらくなったことで、エアロゾルを含んだ気相が凝縮し終わらないうちに環境に放出されていくためだと考えられる。また、気相蒸気割合が増加するにつれて DF が増加する傾向が見られ、プール部において蒸気を含んだ混合気体が凝縮される際にエアロゾルが捕集され、DF が増加したと考えられる。

図 6-14 に気相蒸気割合が及ぼす DF への影響を示す。図 6-14 より、気相蒸気割合が 50% までは DF は一定となったが、それを超えると気相蒸気割合が増加するにつれて、DF が増加する傾向が得られた。また、MELCOR で得られた DF は、既存研究で得られた DF よりも 1 オーダー程度低い傾向となり、安全側の評価となった。

本解析条件において MELCOR で得られた DF は、既存研究の Hakii らが実験から取得した DF と定性的な傾向は一致したが、定量的な値としては差が表れる結果となった。蒸気凝縮がない条件においても MELCOR で得られた DF は Hakii らの結果よりも小さい結果となった。このことは、蒸気凝縮の影響が及ばない、慣性衝突による DF への寄与が MELCOR では実験結果よりも過小評価されているために差が生じていることが考えられる。今後は、なぜ差が生じるのか、他の実験データとの比較、コードの調査を通じて、モデルにおいてどこを改良すべきかさらに調査を進め、より実験との誤差が小さく、エアロゾルの除染機構をよく再現できるモデルの高度化を進めていく。

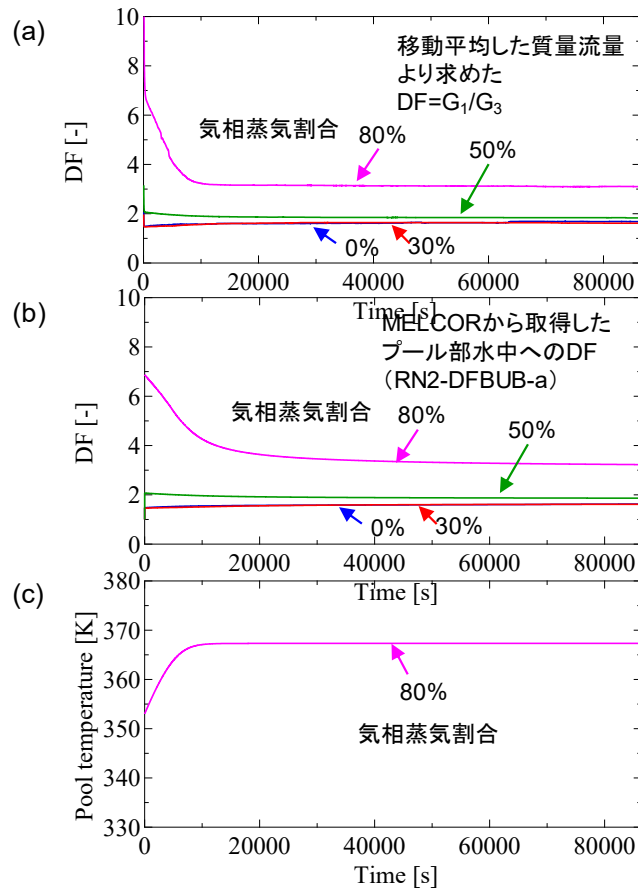


図 6-13 気相蒸気割合が及ぼす DF への影響の時系列変化

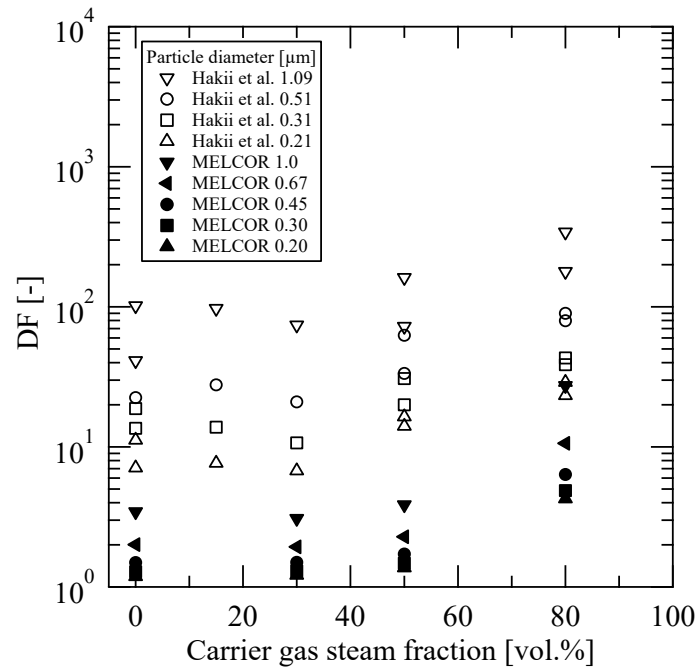


図 6-14 気相蒸気割合が及ぼす DF への影響

文献目録

- [1] 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.
- [2] P. C. Owczarski and K. W. Burk, "SPARC-90: A code for calculating fission product capture in suppression pools", Pacific Northwest Laboratory, NUREG/CR 5765, 1991
- [3] Hill and Micaiah John Muller, "On a spherical vortex, "Philosophical Transactions of the Royal Society of London. A, vol. 185, pp. 213-245, 1894.
- [4] T. Demitrack and F. J. Moody, "Planetary ellipsoid bubble model for fission product scrubbing," Transactions of the American Nuclear Society, vol. 45, pp. 483-485, 1983.
- [5] M. J. M. Hill, On a Spherical Vortex, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, pp. 213-245, Vol.185, 1894.
- [6] Bird, R. Byron, Warren E. Stewart, and Edwin N. Lightfoot., "Transport phenomena," Madison, USA, 1960.
- [7] A. T. Wassel, A. F. Mills, D. C. Bugby and R. N. Oehlberg, "Analysis of radionuclide retention in water pools," Nuclear Engineering and Design, vol. 90(1), pp. 87-104, 1985.
- [8] N. Zuber and J. Findlay, "Average volumetric concentration in two-phase flow systems," Journal of heat transfer, vol. 87(4), pp. 453-468, 1965.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] T. Okawa, T. Tanaka, T. Kataoka and M. Mori, "Temperature effect on single bubble rise characteristics in stagnant distilled water," International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 46(5), pp. 903-913, 2003.
- [12] R. M. Wellek, A. K. Agrawal, and A. H. P. Skelland, "Shape of liquid drops moving in liquid media," AIChE Journal, vol. 12(5), pp. 854-862, 1966.
- [13] Y. Abe, K. Fujiwara, S. Saito, T. Yuasa and A. Kaneko, "Bubble dynamics with aerosol during pool scrubbing," Nuclear Engineering and Design, vol. 337, pp. 96-107, 2018.
- [14] T. Keris, "Digital holographic interference-phase measurement using the Fourier-transform method," JOSAA, vol. 3(6), pp. 847-855, 1986.

- [15] M. A. Herráez, D. R. Burton, M. J. Lalor and M. A. Gdeisat, "Fast two-dimensional phase-unwrapping algorithm based on sorting by reliability following a noncontinuous path," *Applied optics*, vol. 41(35), pp. 7437-7444, 2002.
- [16] Y. Tagawa, A. Funakubo, S. Takagi, Y. Matsumoto, 界面活性剤溶液中を 3 次元運動する単一気泡の挙動 (第 2 報: 準定常運動する気泡に働く力とスリップ条件), 日本機械学会論文集 B 編, pp. 723-733, Vol. 78-788, 2012.
- [17] T. Kanai, M. Furuya, T. Arai, K. Shirakawa, ワイヤメッシュセンサの流れ場への影響と適用範囲の評価, 電力中央研究所, 研究報告 L10003, 2011.
- [18] Prasser, H.-M., Scholz, D., Zippe, C., "Bubble size measurement using wire-mesh sensors," *Flow Meas. Instrum.* **12**, pp. 299-312, 2001.
- [19] K. Yamamoto et al., Bubble dynamics with aerosol in swarm flow during pool scrubbing, Proceedings of the 10th Japan-Korea symposium on nuclear thermal hydraulics and safety, 2016.
- [20] Wellek, R.M., Agrawal, A.K., Skelland, A.H.P., Shape of liquid drops moving in liquid media, *AIChE J.*, pp. 854-862, Vol.12, 1966.
- [21] S.Z. Li, A.K. Jain, *Encyclopedia of Biometrics*, DOI 10.1007/978-1-4899-7488-4, Gaussian Mixture Models, pp. 827-832, Springer Science+Business Media New York, 2015.
- [22] 高木周, 宇田東樹, 渡邊祐二, & 松本洋一郎. "界面活性剤を含む水中を上昇する気泡の挙動: 第 1 報, 定常挙動 (流体工学, 流体機械)". 日本機械学会論文集 B 編, 69(686), 2192-2199. 2003.
- [23] 川北公夫, 湯浅泰伸, & 山城光雄. 粉体の基礎物性に関する研究 (第 1 報). 色材協会誌, 53(6), 327-335. 1980
- [24] Quanbin Zhao, Takashi Hibiki, "Review: Condensation regime maps of steam submerged jet condensation", *Progress in Nuclear Energy*, 107,31-47,2018
- [25] C. Bernaa, A. Escriváa, J.L. Munoz-Cobo, L.E. Herranz."Enhancement of the SPARC90 code to pool scrubbing events under jet injection regime" *Nuclear Engineering and Design* ,300, 563-577. 2016
- [26] 孫昊旻,柴本泰照,岡垣百合亜,与能本泰介,“プールのスクラビング実験におけるエアロゾル除染係数計測の誤差低減に関する検討”,日本原子力学会「2016年春の大会」
- [27] 小林幹佳, “水中に懸濁した微粒子の凝集分散--基礎理論とその適用性” 塗装工学,第 45 卷,11 号 pp. 419-432, 2010.
- [28] 原子力学会, “3 号機のベントに関する検討”
- [29] 遠藤禎行, 向阪保雄, 西江恭延. “2 粒子間に働く液架橋付着力の解析”. 化学工学論文集, 19 (1), 55-61. 1993.
- [30] 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.

- [31] L. E. Herranz, Vi. Peyrés, J. Polo, M. J. Escudero, M. M. Espigares and J. López-Jiménez, “Experimental and Analytical Study on Pool Scrubbing Under JET Injection Regime,” *Nuclear Technology*, vol. 120(2), pp. 95-109, 1997.
- [32] J. Hakii et al., “Experimental study on aerosol removal efficiency for pool scrubbing under high temperature steam atmosphere,” *Proceedings of the 21st DOE/NRC Nuclear Air Cleaning Conference*, NUREG/CP-0116, Vol.2, 1985.

リサイクル適性 (A)

この印刷物は、印刷用の紙へ
リサイクルできます。