

平成 28 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

国立大学法人筑波大学
平成 29 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	2
2. 委託業務の目的	2
3. 委託業務の内容	2
3.1. 単一気泡中のエアロゾル挙動	3
3.1.1. 本項で着目する MELCOR におけるモデル	6
3.1.2. Hill's Spherical Vortex の概要	8
3.1.3. 実験装置	10
3.1.4. 光学系	13
3.1.5. 計測項目	13
3.1.6. 実験条件	13
3.1.7. 可視化計測方法	15
3.1.7.1. PIV 計測方法	15
3.1.7.2. ステレオ PIV の方法	15
3.1.7.3. カメラキャリブレーション	15
3.1.7.4. 蛍光粒子による計測	18
3.1.7.5. ホログラフィ実験	20
3.1.8. Clift 線図による気泡と油滴の比較	21
3.1.9. 気泡内エアロゾル挙動の解析	24
3.1.10. 気泡中のエアロゾル挙動	26
3.1.10.1. ノズル出口付近における挙動	26
3.1.10.2. 気泡上昇時の 2D3CPIV 結果	27
3.1.10.3. 気泡内の可視化に関する光学的考察	29
3.1.11. 油滴中の微粒子挙動	32
3.1.11.1. 上昇する油滴に対する PIV	32
3.1.11.2. Wobbling する油滴に対する PIV	38
3.1.11.3. 上昇する油滴に対する 2D3CPIV	41
3.1.11.4. ノズル離脱直後の油滴に対する PIV	43
3.1.11.5. 油滴と気泡可視化結果の比較考察	44
3.1.12. ホログラフィ実験による気泡計測手法の開発	45
3.1.13. 本項のまとめ	47
3.2. 気泡の 2 相流挙動評価	49
3.2.1. 実験装置および実験方法	52
3.2.1.1. 実験装置の概要	52
3.2.1.2. エアロゾル計測系	54
3.2.1.3. 給排水系	55
3.2.2. 実験方法	58
3.2.2.4. 流動可視化手法	58
3.2.2.5. エアロゾル模擬粒子（トレーサ粒子）の選定	59
3.2.2.6. PIV を用いた粒子挙動の可視化手法	60
3.2.2.7. ボイド率計測	61

3.2.2.8	エアロゾル計測の検討	66
3.2.2.9	液相温度および圧力計測	69
3.2.2.10	試験条件.....	71
3.2.3	気相噴流の流動構造の評価	72
3.2.4	気相存在頻度による噴流幅の計測	72
3.2.5	ボイド率分布の評価	74
3.2.5.11	気相流量およびノズル径によるボイド率変化	77
3.2.5.12	差圧計測による妥当性確認.....	79
3.2.6	気相界面速度分布の評価	80
3.2.6.13	気相流量およびノズル径による速度変化.....	81
3.2.6.14	画像処理を用いた単一気泡による妥当性確認.....	82
3.2.7	気相噴流中の気泡挙動の評価	83
3.2.7.15	水－空気系における気泡挙動.....	83
3.2.7.16	エアロゾルを含む気泡挙動の評価.....	92
3.2.7.17	水－蒸気系における気泡挙動の評価.....	94
3.2.8	気相噴流中エアロゾル挙動の評価	96
3.2.9	水－空気系における気相噴流中のエアロゾル挙動	96
3.2.9.18	気泡内エアロゾル粒子挙動の可視化観測.....	96
3.2.9.19	エアロゾル粒子の液中移行挙動の可視化観測.....	97
3.2.10	水－蒸気系における気相噴流中のエアロゾル挙動	101
3.2.11	解析モデル式比較とその除染評価	102
3.2.11.20	高さ毎のスウォーム平均速度の比較	104
3.2.11.21	気泡の扁平率の比較	105
3.2.11.22	気泡の上昇速度の比較	107
3.2.12	必要とされる計測項目に対しての現状と展望	109
3.2.13	まとめ	116
3.3	MELCOR による DF 解析	118
3.3.1	プールスクラビングによる DF 解析の概要	118
3.3.2	プールスクラビングに関する流動モデル概要	120
3.3.3	プールスクラビングに係る除染モデル概要	122
3.3.4	解析体系および解析条件	123
3.3.5	体系内の流況の時間変化例	126
3.3.6	体系内のエアロゾル輸送の時間変化	128
3.3.7	DF に対する粒子径の影響	132
3.3.8	本項のまとめ	137

図目次

図 3-1 単一気泡によるエアロゾル挙動測定実験 実験装置概念図	3
図 3-2 単一気泡によるエアロゾル挙動測定実験 実験部概念図	4
図 3-3 プールスクラビングの概要図.....	7
図 3-4 単一気泡の内部流動から見たプールスクラビング	7
図 3-5 Hill's Spherical Vortex による流跡線	9
図 3-6 単一気泡実験装置図全体図.....	11
図 3-7 単一気泡実験装置上面図.....	12
図 3-8 気泡の等価直径と上昇速度の関係	12
図 3-9 二次元 PIV 装置図	16
図 3-10 二次元 PIV の概要	16
図 3-11 シャインプルーフの原理.....	17
図 3-12 キャリブレーション方法	17
図 3-13 キャリブレーション画像.....	18
図 3-14 散乱光と界面計測.....	19
図 3-15 蛍光光による実験.....	19
図 3-16 ホログラフィ装置上面図	20
図 3-17 Clift 線図上における本実験条件.....	23
図 3-18 真球中のエアロゾル挙動	25
図 3-19 真球からのエアロゾル離脱	25
図 3-20 ノズル出口真上におけるエアロゾル散乱光の可視化	26
図 3-21 ノズル出口直上におけるエアロゾル蛍光発光の可視化	26
図 3-22 気泡上昇時の追跡画像 カメラ 1.....	27
図 3-23 気泡上昇時の追跡画像 カメラ 2.....	27
図 3-24 気泡上昇時のステレオ PIV 結果.....	28
図 3-25 気泡に対するベクトルの三次元図.....	28
図 3-26 気泡画像の一例.....	30
図 3-27 エアロゾル散乱光とバックライトの光路	30
図 3-28 バックライトの光路.....	30
図 3-29 バックライトの光路計算.....	31
図 3-30 エアロゾル散乱光の光路	31
図 3-31 エアロゾル散乱光の光路計算	31
図 3-32 上昇油滴の可視化結果.....	32
図 3-33 上昇油滴中の流速平均	33
図 3-34 上昇単一気泡中の速度分布	33
図 3-35 重心検出プログラムの実行内容	35
図 3-36 油滴の重心座標.....	35
図 3-37 上昇油滴の重心位置を一定にした画像	36
図 3-38 画像処理後の油滴中の PIV 結果.....	36
図 3-39 画像処理後の上昇油滴の流速平均	37
図 3-40 画像処理後油滴中の流速分布	37

図 3-41 油滴中の流跡線.....	38
図 3-42 wobbling する大油滴	39
図 3-43 大油滴に対する PIV 結果	39
図 3-44 揺動油滴の静止座標系から見た PIV 結果	39
図 3-45 画像処理後の大油滴の流速平均	40
図 3-46 大油滴内の速度分布	40
図 3-47 wobbling する油滴内の流跡線.....	41
図 3-48 カメラ 1 による画像	42
図 3-49 カメラ 2 による画像	42
図 3-50 ステレオ PIV による油滴撮影	42
図 3-51 油滴に対するベクトルの三次元図.....	42
図 3-52 ノズル離脱直後の油滴に対する PIV	43
図 3-53 離脱時の垂直方向の速度分布	44
図 3-54 油滴画像の一例.....	44
図 3-55 カメラの撮影範囲と光路長の関係	46
図 3-56 光学系によって生じた干渉縞	46
図 3-57 片側の光路のみで発生した干渉縞.....	46
図 3-58 気泡の 2 相流挙動評価実験装置 試験部概念図	49
図 3-59 実験装置の全体系統図	53
図 3-60 製作した二相流評価試験部	53
図 3-61 三次元トラバース機構の概念図.....	54
図 3-62 三次元トラバース機構の製作図面.....	55
図 3-63 温度成層の実現方法	56
図 3-64 密度成層の形成	56
図 3-65 加熱タンク 概略図.....	57
図 3-66 純粋装置の概略図	57
図 3-67 流動可視化手法_概念図.....	58
図 3-68 製作した試験部における可視化箇所.....	59
図 3-69 PIV 計測_概念図.....	61
図 3-70 二次元 PIV の原理.....	61
図 3-71 製作したワイヤメッシュセンサ	63
図 3-72 製作した試験部におけるボイド率計測箇所	63
図 3-73 WMS によるボイド率計測位置の変更方法	64
図 3-74 WMS の電気系統図エラー! 参照元が見つかりません。	65
図 3-75 ボイド率計算図エラー! 参照元が見つかりません。	65
図 3-76 上流側 WMS および下流側 WMS の相互相関例	66
図 3-77 エアロゾル計測の実験体系	66
図 3-78 エアロゾル計測原理_概念図	67
図 3-79 濃度を概算するための計算体系	68
図 3-80 エアロゾル濃度範囲	69
図 3-81 熱電対設置箇所	70
図 3-82 差圧によるボイド率計算の概念図.....	71

図 3-83	気相噴流全体像の可視化結果	73
図 3-84	気相存在頻度による噴流幅の計測_流量依存性	73
図 3-85	気相存在頻度による噴流幅の計測_ノズル径依存性	74
図 3-86	WMS によるボイド率分布計測例(z=700mm)	75
図 3-87	手動で同時計測した可視化結果例(z=700mm)	75
図 3-88	計測時の流路断面の平均ボイド率の時系列結果	76
図 3-89	各高さ位置でのボイド率分布の時空間図	76
図 3-90	各高さ位置での断面平均ボイド率分布	77
図 3-91	ボイド率分布_気相流量依存性	78
図 3-92	ボイド率分布_ノズル径依存性	78
図 3-93	中心軸上ボイド率_気相流量依存性.....	79
図 3-94	中心軸上ボイド率_ノズル径依存性	79
図 3-95	差圧計測と WMS によるボイド率の比較	80
図 3-96	各高さ位置での気相界面速度分布.....	80
図 3-97	気相界面速度分布_気相流量依存性	81
図 3-98	気相界面速度分布_ノズル径依存性.....	82
図 3-99	画像処理による気泡の速度の時系列結果	83
図 3-100	単一気泡計測時のボイド率の時系列結果	83
図 3-101	低流速気泡噴流挙動の高さ毎の可視化結果.....	84
図 3-102	高流速気相噴流の高さ毎の可視化結果.....	85
図 3-103	水面での可視化結果.....	85
図 3-104	気泡のナンバリング処理.....	86
図 3-105	高さ毎の気泡径分布_流量依存性	87
図 3-106	高さ毎の気泡径分布_ノズル依存性(流量一定)	87
図 3-107	高さ毎の気泡径分布_ノズル依存性(流速一定)	88
図 3-108	気泡径の測定手順	89
図 3-109	各高さ位置での気泡径分布と可視化画像.....	90
図 3-110	Clift らの気泡の形状評価にマッピングした結果.....	91
図 3-111	可視化による気泡群中の気泡の上昇速度.....	91
図 3-112	WMS による気泡の上昇速度計算の処理画像	92
図 3-113	エアロゾルを含む気泡の可視化結果	93
図 3-114	エアロゾルの有無による気泡径分布の違い	93
図 3-115	エアロゾルの有無によるアスペクト比の違い	93
図 3-116	エアロゾルを含む気泡の上昇速度計測	94
図 3-117	Clift らの気泡の上昇速度にマッピングした結果.....	94
図 3-118	蒸気を用いたノズル出口での可視化結果.....	95
図 3-119	気泡内エアロゾル挙動の可視化.....	96
図 3-120	水-空気系におけるエアロゾルの液中移行挙動	98
図 3-121	移行したエアロゾルの粒子径の概算	99
図 3-122	低流速気相噴流の液中移行時の瞬時 PIV 計測結果	99
図 3-123	気相噴流界面におけるエアロゾルの液中移行挙動	99
図 3-124	移行したエアロゾルの粒子径の概算	100

図 3-125	液中移行時の瞬時 PIV 計測	100
図 3-126	気相噴流界面の液中移行時の時系列 PIV 計測	100
図 3-127	蒸気凝縮によるエアロゾルの液中移行挙動	101
図 3-128	凝縮後のエアロゾルの回転挙動.....	101
図 3-129	スウォーム上昇速度の式の比較(流量変化)	105
図 3-130	スウォーム上昇速度の式の比較(ノズル径変化)	105
図 3-131	気泡の扁平率の比較結果	107
図 3-132	気泡の上昇速度の比較結果.....	108
図 3-133	奥行きによる誤差の評価	109
図 3-134	気泡塊の上昇速度の試算	110
図 3-135	エアロゾル計測器による液滴計測	111
図 3-136	温度成層の形成時の温度計測箇所.....	112
図 3-137	温度成層の形成時の時系列温度変化.....	112
図 3-138	温度成層形成後の時系列温度変化	113
図 3-139	蒸気混入による水槽内の温度上昇	113
図 3-140	温度成層の実現過程	114
図 3-141	水槽の表面の温度から液相温度の計算。	115
図 3-142	温度成層の成層厚さの評価	115
図 3-143	エアロゾルの質量分布 [1].....	119
図 3-144	SPARC-90 における流動モデル	120
図 3-145	SPARC-90 における気泡モデル	121
図 3-146	SPARC-90 における除染モデル	122
図 3-147	解析体系	123
図 3-148	解析体系の主要なパラメータの入力値	124
図 3-149	エアロゾルの入力値	124
図 3-150	各ボリュームの圧力.....	126
図 3-151	各ボリュームの温度.....	127
図 3-152	各ボリュームのボイド率.....	127
図 3-153	プール部水中に捕集されたエアロゾル質量	129
図 3-154	プール部ガス中に残存するエアロゾル質量.....	129
図 3-155	環境に放出されたエアロゾル質量.....	130
図 3-156	タンク部からプール部水中へのエアロゾル質量流量	130
図 3-157	プール部水中からガスへのエアロゾル質量流量	131
図 3-158	プール部ガスから環境へのエアロゾル質量流量	131
図 3-159	エアロゾル質量流量から求めた除染係数	134
図 3-160	MELCOR から出力された除染係数	134
図 3-161	エアロゾル質量流量から求めた除染係数のヒストグラム	135
図 3-162	MELCOR から出力された除染係数のヒストグラム	135
図 3-163	エアロゾル質量流量から求めた除染係数と粒径の関係.....	136
図 3-164	MELCOR から出力された除染係数と粒径の関係	136

表目次

表 1 単一気泡によるエアロゾル挙動測定実験基本仕様	4
表 2 粒子の物性	14
表 3 試験流体の物性	14
表 4 気泡に関する物性値と物理量	22
表 5 周囲流体に関する物性値	22
表 6 無次元数の計算結果	22
表 3.2-1 気泡の 2 相流挙動評価実験基本仕様	50
表 3.2 用いたトレーサー粒子の種類.....	59
表 3.3 エアロゾルスペクトロメーター仕様.....	67
表 3.4 エアロゾルジェネレーター仕様.....	69
表 3-5 解析条件	125

1. 委託業務題目

平成 27 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）事業

2. 委託業務の目的

現状の PWR プラントでは、蒸気発生器伝熱管破損事故等において、水中に核分裂生成物の混入したガスが流入するため、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。また、BWR の重大事故時においても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。シビアアクシデント発生時の環境へ放出するソースターム量を正確に評価する観点から、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。一方、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が続いている。

本委託では、試験を実施して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プールスクラビング現象について、小規模試験により、幅広い条件で二相流動とエアロゾル挙動の関係を詳細に把握して整理し、核分裂生成物の除去効果を評価するための基礎データを取得する。

3.1. 単一気泡中のエアロゾル挙動

本実験では、プールスクラビング現象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または少数気泡の挙動及び気泡内外の詳細なエアロゾル挙動を高い時間解像度で把握するための実験を実施する。表 1 に実験の基本仕様を示す。また、図 3-1 に実験装置の概念図、図 3-2 に実験部の概略図を示す。図に示すように、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る。その際の気泡と気泡内外のエアロゾル挙動を高速度カメラやPIV 等を使用して詳細に計測する。流体条件は大気圧、常温～100℃とし、ガス流量、ガス成分割合等をパラメータとして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製作した実験装置において、昨年度までに得られた知見及び確立した 3 次元計測技術等を用い、気泡界面挙動とエアロゾル挙動に注目し、データを取得する。

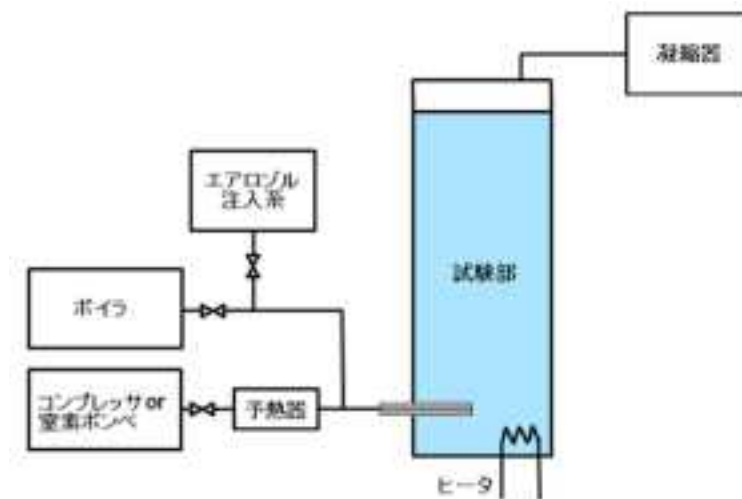


図 3-1 単一気泡によるエアロゾル挙動測定実験 実験装置概念図

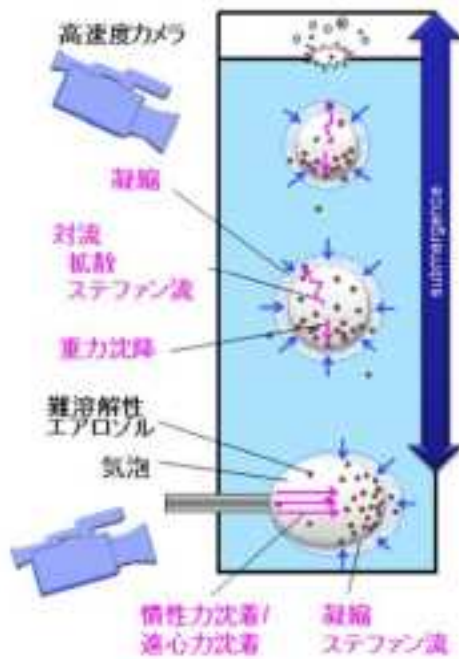


図 3-2 単一気泡によるエアロゾル挙動測定実験 実験部概念図

表 1 単一気泡によるエアロゾル挙動測定実験基本仕様

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 等	実験計画及び予備実験により検討する。
試験条件	大気圧，常温～100℃	
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	
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：0.1～1 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	・ 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。

3.1.1. 本項で着目する MELCOR におけるモデル

MELCOR において使用されている従来のプールスクラビングに関するモデルである。これによるとプールスクラビングにおいて粒子の動きは、巨視的には周囲流体と FP を含んだエアロゾルによる二相流として捉えることができる。気泡は上昇するに従って状態を変え、図 3-3 に示すようにそれぞれエアロゾルが管から出た直後の i) ベント出口領域、一定の形状を保って上昇する ii) スウォーム上昇領域、気泡が空気との界面に到達する iii) 気泡破裂領域の 3 つに分けることができる。それぞれの領域において除染に影響する要素ごとに DF が定められている。この DF とはスクラビング前のエアロゾルの総質量濃度をスクラビング後の値で除したものである。ベント出口領域における DF は一つ目に気泡の拡散泳動や凝縮による DF_{EC} が挙げられる。次に、気泡完成衝突による $DF_{II,i}$ 、最後に粒子の拡散や重力沈降による $DF_{ER,i}$ が挙げられる。次に、スウォーム上昇領域では気泡内の重力沈降やブラウン拡散を考慮した $DF_{SR,i}$ が挙げられている。これら全てを掛け合わせることで全体の除染係数 $DF_{OV,i}$ が得られる。なお、MELCOR においては液面におけるエントレインメントの影響は考慮されていない。

単一気泡中のエアロゾル挙動は微視的には、二相流を構成する気泡内部流動によるエアロゾル挙動として捉えることもできる。これは、MELCOR においてはスウォーム領域における DF である、 $DF_{SR,i}$ を対象としている。この項目では気泡の内部のエアロゾルに対しては、気泡表面に対する法線方向の速度成分を表している。それぞれの成分は図 3-4 に示されるように i) 遠心力による速度 $V_{c,i}$ 、ii) ステファン流による速度 V_v 、iii) 重力沈降による速度 $V_{g,i}$ 、iv) ブラウン運動による $V_{D,i}$ の四成分で表すことができる。なお、図中に示されている界面速度 V_s は界面の接線方向に向かう速度であるものの、この流動によって誘起された気泡内の旋回流が遠心力を生むとされている。これらをたし合わせた気泡界面に向かう速度の合計 $V_{n,i}$ を以下の式のようにあらわすことができる。

$$DF_{OV,i} = DF_{EC} \times DF_{II,i} \times DF_{RR,i} \times DF_{SR,i} \quad (1)$$

$$V_{n,i} = V_{c,i} + V_v + V_{g,i} \cos \beta + V_{D,i} \quad (2)$$

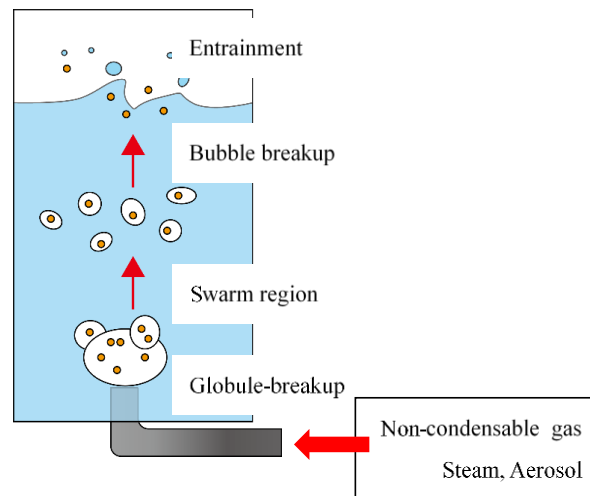


図 3-3 プールスクラビングの概要図

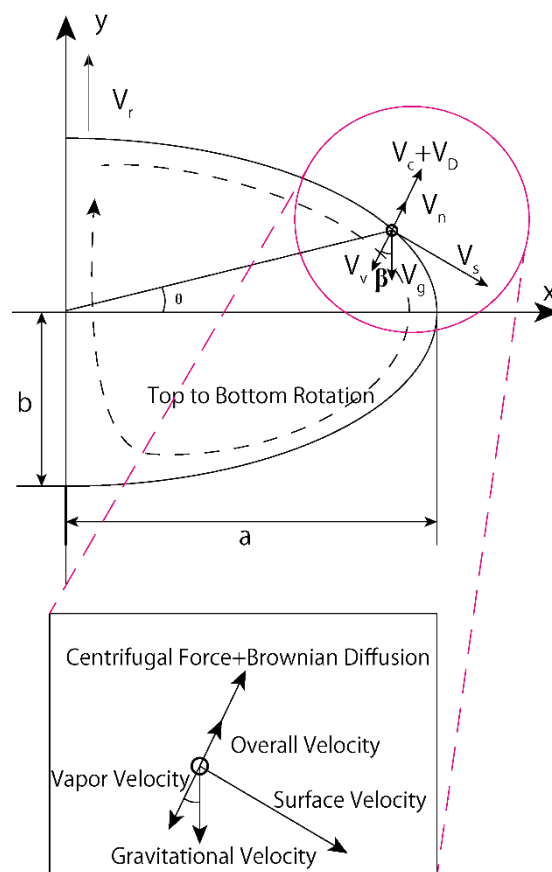


図 3-4 単一気泡の内部流動から見たプールスクラビング

3.1.2. Hill's Spherical Vortex の概要

SPARC-90 においては Hill's Spherical Vortex が界面速度を求める際に引用されている。

ある周囲流体の一様流中に別の流体が球形の状態を維持して存在をする場合，球の内部には渦輪が発生する．その断面上にある渦輪に関して解いた流れ関数が Hill's Spherical Vortex である．

Hill's Spherical Vortex はまず，Fuch らによって気泡を真球と仮定した場合の流動として使用された．Moody らはさらに気泡を扁球と仮定して解くことで Hill's Spherical Vortex を扁球に拡張した．MELCOR では，扁球に拡張された Hill's Spherical Vortex の式を元にして，界面速度を評価している．

ここで，周囲流体の一様な流速を U ，球の半径を a ，球を極座標表示にすることにより動径 r ，偏角 θ として式(3)のように表される．式によって表された流れ関数を x 方向速度 v_x ， y 方向速度 v_y に関して解くと式(4)のように表すことができる．

このとき，球の半径 a を 0.004 mm ，一様流速 U を 0.22 m/s として x 軸の方向の一様流を仮定して流跡線を描くと，以下の図 23 のように表すことができる．

$$\psi = -\frac{3U}{4a^2}(a^2 - r^2)r^2\sin^2\theta \quad (3)$$

$$\begin{aligned} v_x &= -\frac{3U}{2a^2}(3y^2 + x^2 - a^2) \\ v_y &= -\frac{3U}{a^2}xy \end{aligned} \quad (4)$$

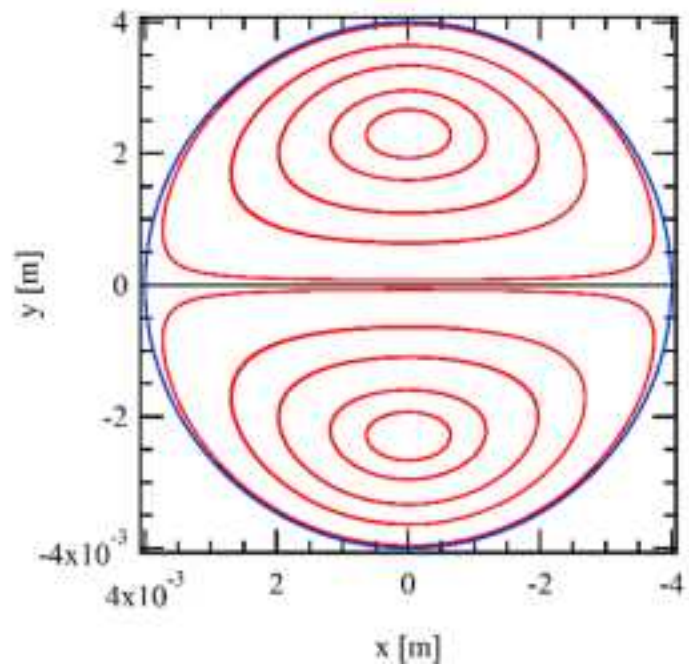


図 3-5 Hill' s Spherical Vortex による流跡線

3.1.3. 実験装置

本実験において使用する単一気泡実験装置の全体図と上面図を図 3-6, 並びに図 3-7 に示す. 本実験装置は試験部, 上下動装置, 光学系の三つに分けることができる. それぞれの部分に対する説明を以下に述べる.

試験部の寸法は高さ 1500 mm, 幅 340 mm の八角形の水槽である, 壁の材質はポリカーボネートである. 水槽が八角形なのはレーザーの出口と入り口, LED バックライト 2 つ, ハイスピードカメラ(Photron 社製 MiniUX-100)2 台に対してそれぞれ真っ直ぐな平面が向かい合うようにするためである. このことにより, 直進光が水槽と水の界面で屈折, 散乱することを防ぐことができる. 試験部下方にはノズルが接続されており, 共通のフランジを使用することで複数の径や形状のノズルに接続することができる.

上下動装置は, 試験部側部を囲むように配置された台のことである. 幅は 560 mm の正方形をしており, 最大速度は 4 cm/s である. 上下動装置の上には図 3-6 で示されるようにシートレーザー光学系, LED 二台, ハイスピードカメラ二台, が搭載されており, それらが気泡の上昇に合わせて上下する機構となっている. MELCOR においては気泡の上昇終端速度は d_B を気泡の等価直径, σ を表面張力, ρ を液体の密度として以下の式(6)によって表すことができる. 式と上下動装置の対応する速度域を比較すると図 3-8 緑の範囲のように最大 1.54 cm まで対応できるという結果となる. MELCOR などではスウォームを構成する気泡径を 0.72 cm で一定としており, 装置の対応する最大径はそれに対して十分に大きいといえる.

光学系は上下動装置の上に配置されており, 図 3-7 から分かるようにレーザーのシート光を水槽の一辺から照射する. レーザー光源(日本レーザー社 DPGL-5W)には最大出力 5 W, 波長 532 nm のグリーンレーザーを用いた. 特徴としては電源やレーザーの発信器はシート光学系から独立しており, 光ファイバーを介してつなげられている. これにより, 繊細な発振器を上下動装置に搭載することなく, シート光学系のみが上下動装置に搭載されるようになる. これにより上下動装置が作動した状態でも常に一定断面にレーザーの焦点を合わせることが可能になる.

シート光学系のスペックは開き角 50 度, シート厚 1 mm となっており, 焦点は水槽内部にあるノズルを基準として合わせる.

ハイスピードカメラはレーザー光をはさむように 90 度方向に 2 台配置されている. それぞれのカメラには 50mm レンズ(Nikon 社製 AiNikkor50mmf1.2S)が取り付けられており, ノズル部付近を 30×30 mm の範囲で撮影することができる. また, カメラの反対側には LED ライトが配置されており, それぞれのカメラの反対方向から気泡の輪郭を抽出する. 構造となっている.

$$V_r(d_B \leq 0.5cm) = 7.876 \left(\frac{\sigma}{\rho} \right)^{\frac{1}{4}} [cm/s]$$

$$V_r(d_B \leq 0.5cm) = 7.876 \left(\frac{\sigma}{\rho} \right)^{\frac{1}{4}} [cm/s] \quad (6)$$

$$V_r(d_B > 0.5cm) = 1.40713 V_r(d_B \leq 0.5cm) d_B^{0.49275} [cm/s]$$

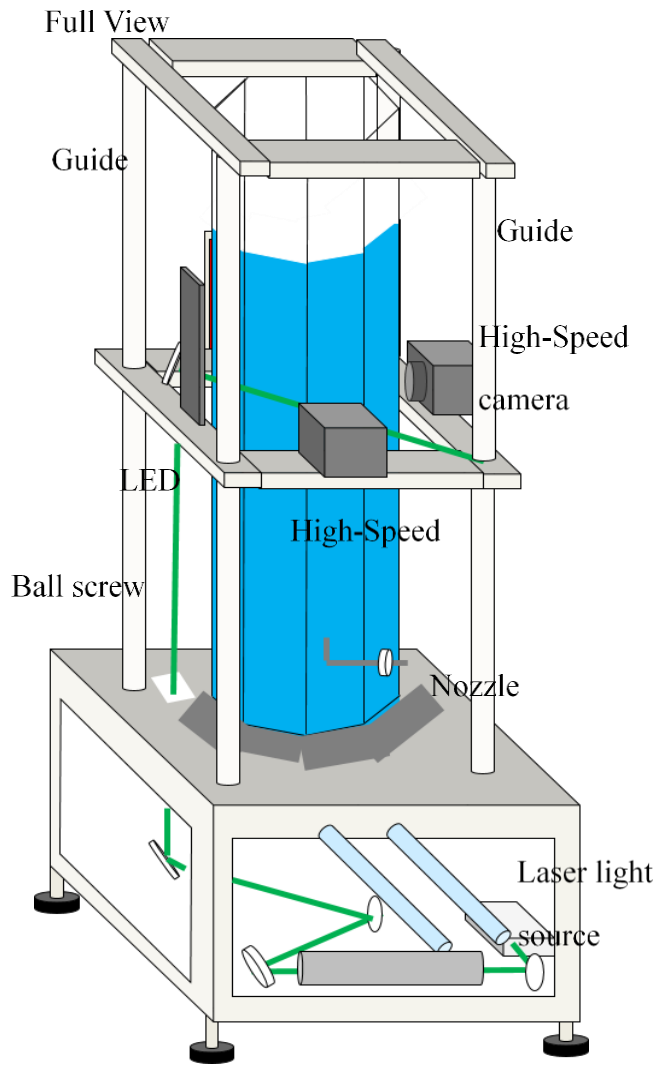


图 3-6 单一气泡实验装置图全体图

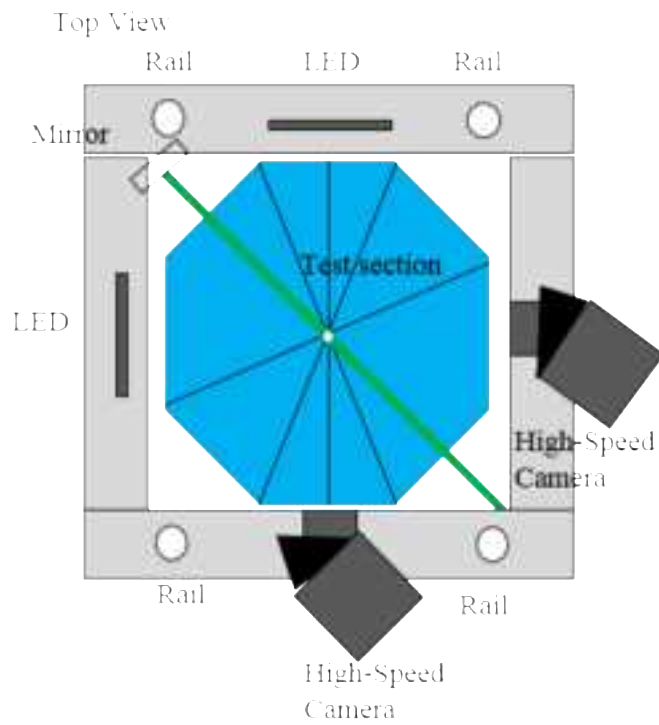


図 3-7 単一気泡実験装置上面図

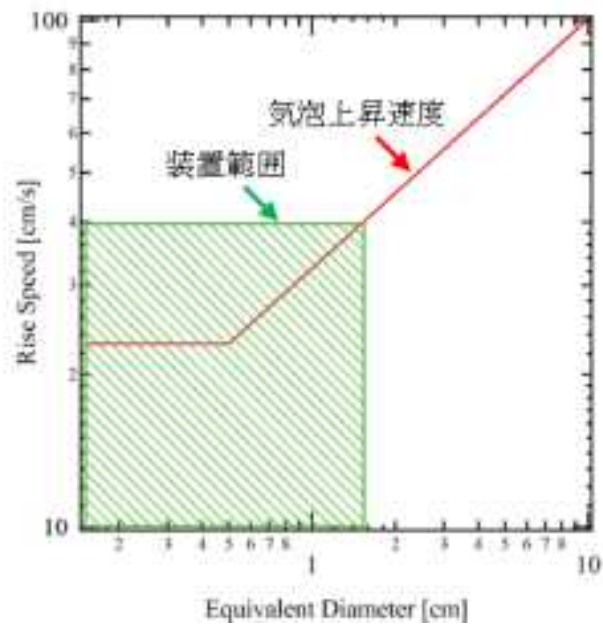


図 3-8 気泡の等価直径と上昇速度の関係

3.1.4. 光学系

光学系は上下動装置の上に配置されており、図 3-7 から分かるようにレーザーのシート光を水槽の一辺から照射する。レーザー光源(日本レーザー社 DPGL-5W)には最大出力 5 W、波長 532 nm のグリーンレーザーを用いた。特徴としては電源やレーザーの発信器はシート光学系から独立しており、光ファイバーを介してつなげられている。これにより、繊細な発信器を上下動装置に搭載することなく、シート光学系のみが上下動装置に搭載されるようになる。これにより上下動装置が作動した状態でも常に一定断面にレーザーの焦点を合わせることが可能になる。

シート光学系のスペックは開き角 50 度、シート厚 1 mm となっており、焦点は水槽内部にあるノズルを基準として合わせる。

ハイスピードカメラはレーザー光をはさむように 90 度方向に 2 台配置されている。それぞれのカメラには 50mm レンズ(Nikon 社製 AiNikkor50mmf1.2S)が取り付けられており、ノズル部付近を 30×30 mm の範囲で撮影することができる。また、カメラの反対側には LED ライトが配置されており、バックライト法によりそれぞれのカメラで気泡の輪郭を抽出する構造となっている。

3.1.5. 計測項目

本研究において想定される物理量としては気泡形状、速度分布、濃度、質量、体積、流量、温度が挙げられる。これらの物理量に対応するように定めた計測項目は気泡の重心位置、軌道、等価直径、気泡内部流動、エアロゾルの種類、エアロゾル濃度、エアロゾル質量、気相体積、気相流量、蒸気温度、液相温度である。本研究にて実施した項目は重心位置、軌道、等価直径、気泡内部流動、エアロゾルの種類である。

3.1.6. 実験条件

本実験に使用した粒子、ならびに試験流体の物性を以下の表 2、ならびに表 3 に示す。試験の選定に関しては既存研究において数十マイクロからサブミクロンオーダーとされており、本実験においてはこの範囲に収まる領域の粒子を選定した。OX-50 シリカ粒子に関しては径が非常に小さいため、密度の厳密な測定ができないことから密度条件を記載していない。試験流体である油滴に関してはシリコンオイル(信越化学製 KF96-0.65cs)水と屈折率が比較的近いこと、並びに水に対して可能な限り比重が小さいことの二点を重視して選択した。表には水の物性も比較のために記載する。

表 2 粒子の物性

Test particle	Density [g/cm ³]	Diameter [μm]	Remarks
Expancel	1.0~1.3	10~17	
OX-50	-	0.04	Hydrophilic
FLUOSTAR	1.1	15	Fluorescence

表 3 試験流体の物性

Test fluid	Density[Kg/m ³]	Viscosity[mPa·s]	Interfacial Tension against Air[N/m]	Refractive Index [-]
Air	1.205	1.822	-	1.000
Silicon Oil	760	0.494	0.039	1.375
Water	998.2	1.004	0.073	1.333

3.1.7. 可視化計測方法

3.1.7.1. PIV 計測方法

PIV とは Particle Image Velocimetry の略で，可視化した粒子の散乱光などから流速や速度方向を計測する手法である．実験装置としては以下に示す図 3-9 のようにカメラに対して粒子を散乱させるレーザーと界面を撮影するための LED バックライトによって構成される．

PIV データの処理方法に関しては以下の図 3-10 に示す．まず，ある流れに対して二枚以上の画像を用意する．まず，画像に対してグリッドを設け，計測をする範囲のみにマスクをかける．画像 1 は $t=t_0$ の時点における粒子の位置やそのパターンを示す．このパターンが，画像 2 の $t=t_0 + \Delta t$ においてどのように変化するかを差分によって導くことでそれぞれの位置における気泡や油滴内の速度ベクトルを出すことができる．本実験においては画像処理に市販の PIV 処理ソフト(西華デジタルイメージ化株式会社製 **Koncerto**)を用いた．このソフトは後述するステレオ PIV に対しても対応している．

3.1.7.2. ステレオ PIV の方法

本実験において使用するステレオ PIV の手法は正確には二次元相互相関 PIV と呼ばれ，別々の場所にカメラを置きながら同一平面内を可視化し，その視差を利用することで奥行き方向の成分を取得している．奥行き方向の成分はシートレーザーの厚みとカメラの被写界深度による．

本実験においては検査断面をはさんで 90 度方向にそれぞれのカメラを配置することで視差を実現している．しかしながら 90 度の配置で視差を生み出すには，カメラのピント平面と撮影面の違いを克服する必要がある．この問題を解決するのがシャインプルーフの原理である．この原理によると，カメラの撮影面と物体の撮影面の間が平行でない場合は，レンズから平行な線に対して両平面が一点で交わる位置でピント平面が合うということである．この交わる点は，図 3-11 においては全ての光軸が交わる赤点で示されている．

3.1.7.3. カメラキャリブレーション

ステレオ PIV におけるキャリブレーションはシャインプルーフの原理の使用による画角の違いや奥行き方向の移動が必要なことから特殊なキャリブレーション方法が必要になる．キャリブレーションにおいては図 3-12 に示すようにキャリブレーションシートをレーザー光源と同軸上に配置し，それぞれ画像を撮影する．レーザー断面の位置を基準にマイクロメータを用いてシートの位置をずらし，-1 mm, 0 mm, 1 mm の地点でそれぞれのカメラ分の計 6 枚の画像を撮影した．実際に使用したキャリブレーション画像を図 3-13 に示す．このことによって単一平面内のみならず奥行き方向に対してもキャリブレーションすることができる．

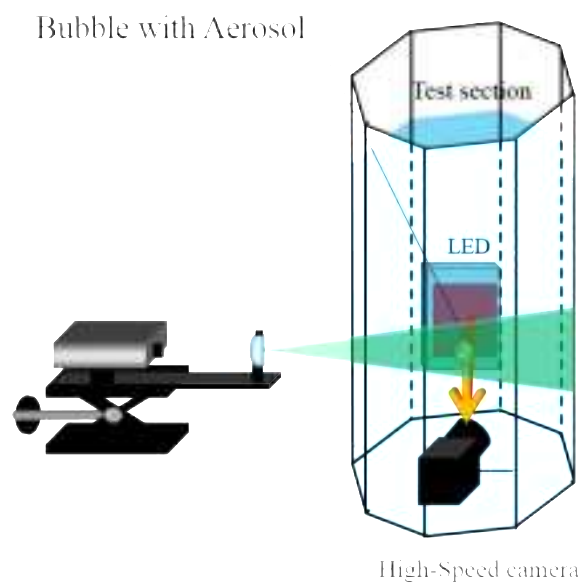


図 3-9 二次元 PIV 装置図

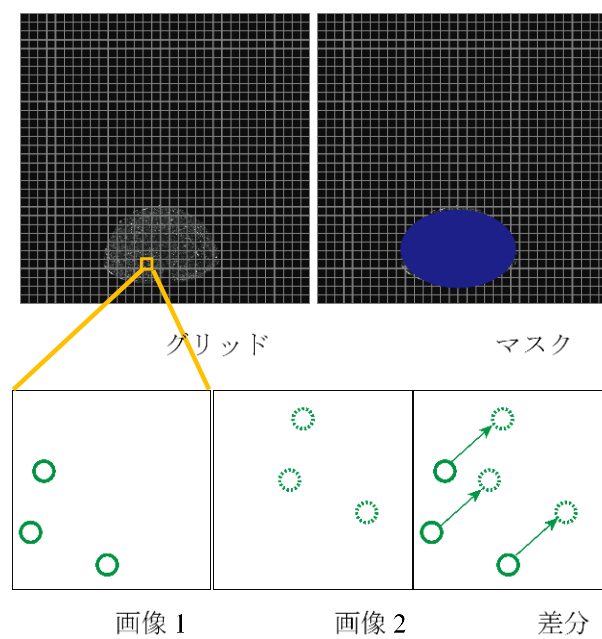


図 3-10 二次元 PIV の概要

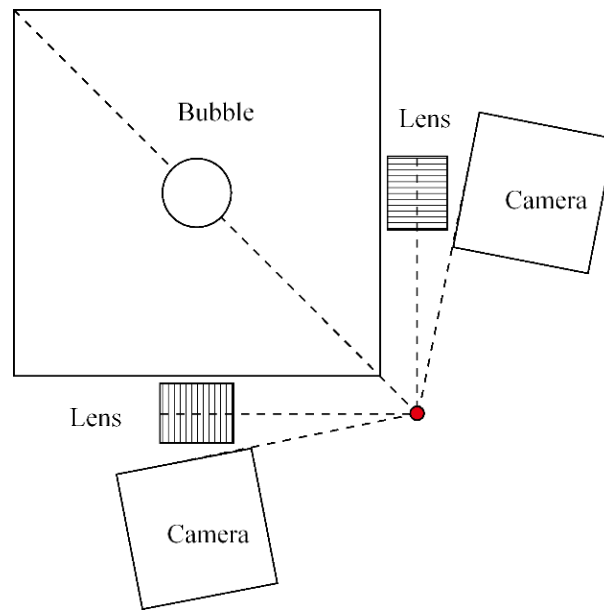


図 3-11 シャインプルーフの原理

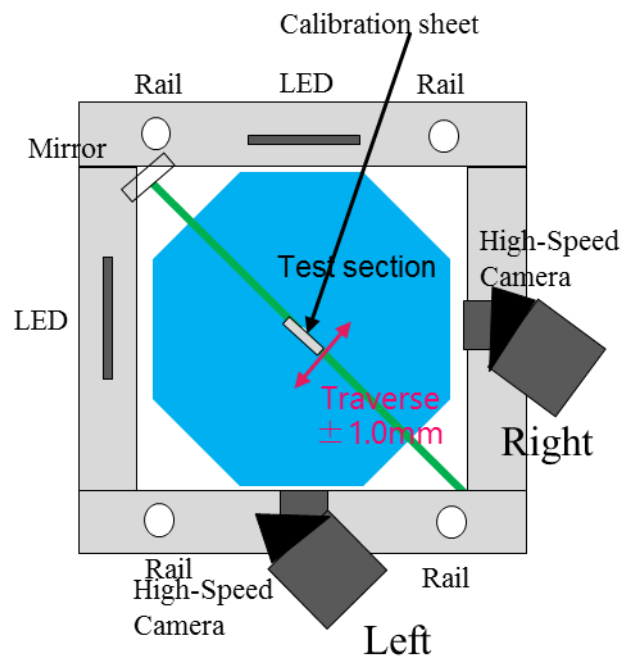


図 3-12 キャリブレーション方法

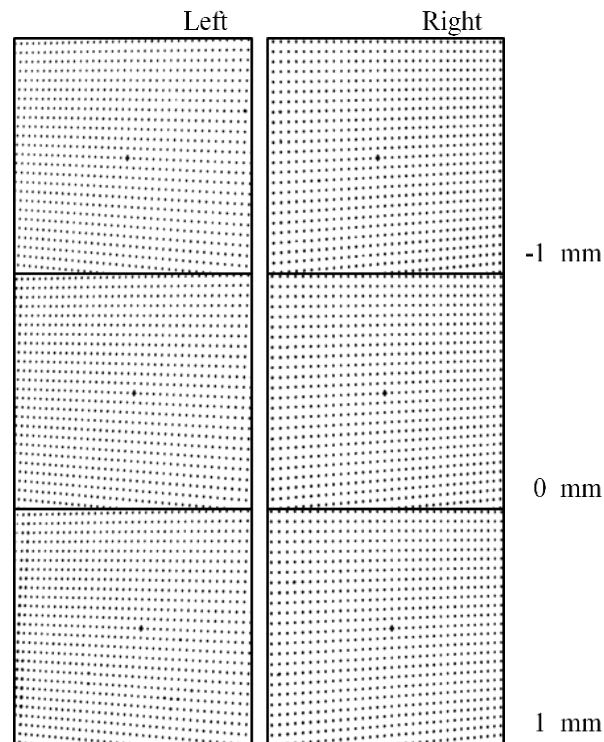


図 3-13 キャリブレーション画像

3.1.7.4. 蛍光粒子による計測

気泡の界面と粒子の同時計測を行う際、気泡界面における散乱光が生じることで界面形状の検知が図 3-14 に示すように正確にできないことがある、これを回避するために本研究では通常の散乱光による PIV に加えて蛍光光を用いた PIV 計測も行う。図 3-15 に具体的な実験方法を示す。界面を計測する際のバックライトと内部の粒子を計測する散乱光はそれぞれ 532 nm と 630 nm というようにそれぞれ波長に違いがある。そこで、吸収した波長に対して蛍光光を発する蛍光粒子を使用することで粒子の散乱光と気泡界面での散乱光を区別する。本実験において使用する蛍光粒子(EBM 社製 FLUOSTAR)はグリーンレーザーの波長を吸収し、580 nm の蛍光光を発する。そのため、550 nm 以下の波長をカットするハイパスフィルターを用いて散乱光をカメラの撮影面に入る前に除去する。

気泡表面に照射された光の散乱光

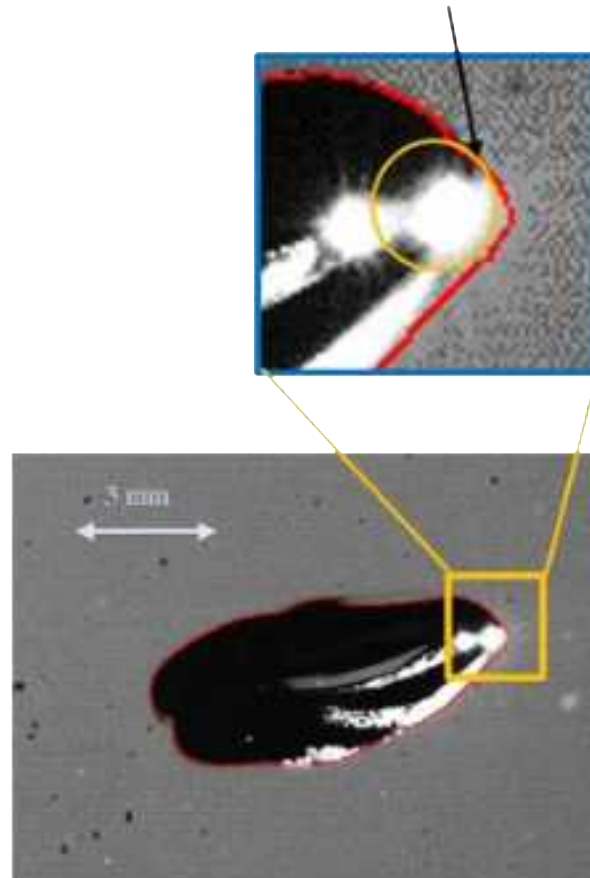


図 3-14 散乱光と界面計測

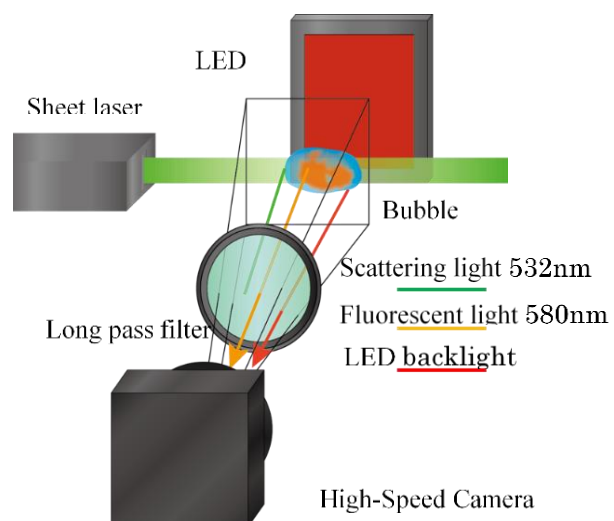


図 3-15 蛍光光による実験

3.1.7.5. ホログラフィ実験

ホログラフィとは干渉縞を用いて粒子の濃度などを測定する実験手法である。装置は図 3-16 から分かるようにコリメータを通した光をハーフミラーとミラーを用いた光学系を利用してカメラに導く。この際の 2 つの光路をそれぞれ以下の図 3-16 におけるミラー2, ミラー3, ミラー4 からなる光路とミラー2, ミラー2', ミラー4 を経由するものとする。ミラー3とミラー4 の間には試験部の水槽の厚みやカバーの材質を同一にした水槽を設けてある。二つの光路は試験部水槽内に気泡を入れていない状態では光路差はないが、気泡を入れると気泡の分だけ光路差が生じ、それによって干渉縞が発生する。この干渉縞を観察することで粒子の濃度や内部の温度などの情報を得る。

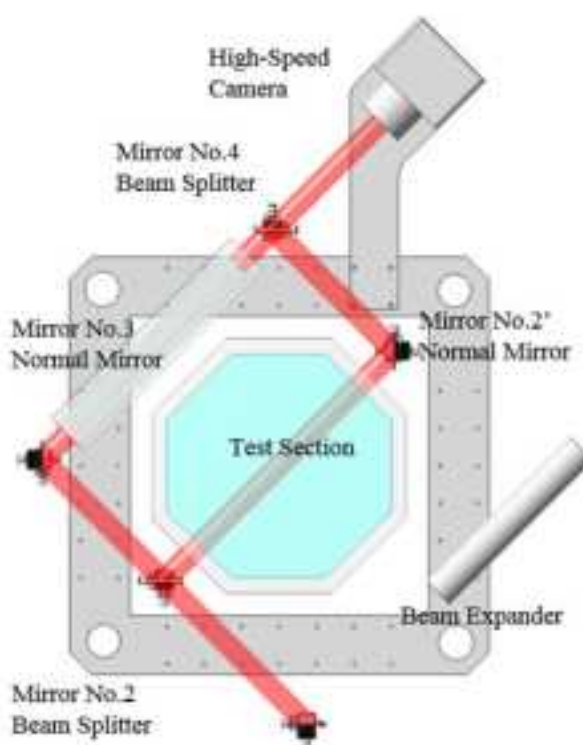


図 3-16 ホログラフィ装置上面図

3.1.8. Clift 線図による気泡と油滴の比較

本実験における目標は気泡中のエアロゾル挙動を可視化することであるが、気泡を可視化する際は光の屈折や界面散乱など様々な問題点がある。そこで、比較的計測が容易な本実験では油滴を用いた実験を行う。そこで気泡と油滴の相関に関して定量評価するための手法として Clift の線図がある。この線図はそれぞれレイノルズ数 Re 、モルトン数 Mo 、エトベス数 Eo の 3 つの無次元数で表され、それぞれ式(5)、(6)、(7)に示す 3 つの式で表される。

また、本実験にて使用する気泡の物性値は水-空気、油滴の物性値は水-シリコンオイル(信越化学製 KF-96L-0.65cs)である。それぞれの値を以下の表 4、ならびに表 5 に示す。また、重力加速度 g としては 9.81 m/s^2 を使用した。

それぞれの物性値を元に Clift の線図で使用される線に点をプロットした計算した結果を以下の表 6 に示す。赤点で示すのが油滴、橙点で示すのが大油滴、青点で示すのが気泡である。油滴と気泡は内径 3 mm のノズルから浮力だけを用いて油滴を生成した際の実験値を、大油滴の方は内径 10 mm のノズルを用いた際の実験値を示す。

Clift の線図にプロットしたものを図 3-14 散乱光と界面計測図 3-17 に示す。図からわかるように気泡と油滴はどちらも近い性質を示すものであるが、気泡はどちらかといえば *wobbling* のように揺動の激しい傾向が、油滴は *spherical* のようにより安定した性質を示す傾向が見受けられる。しかし、大油滴を用いた際はより気泡の *wobbling* に近づく傾向をみせた。

$$Re = \frac{\rho_L U D_{eq}}{\mu_L} \quad (5)$$

$$Eo = \frac{(\rho_L - \rho_g) g D_{eq}}{\sigma} \quad (6)$$

$$Mo = \frac{g \mu_L^4 (\rho_L - \rho_g)}{\rho_L^2 \sigma^3} \quad (7)$$

表 4 気泡に関する物性値と物理量

	記号	油滴	大油滴	気泡
上昇速度 [m/s]	U	0.116	0.185	0.224
表面張力 [N/m]	σ	0.04	0.04	0.076
流体密度 [kg/m ³]	ρ_g	760	760	1.21
等価直径 [mm]	D_{eq}	4.31	10.73	5.03

表 5 周囲流体に関する物性値

水の密度 [kg/m ³]	ρ_L	998
水の粘度 [Pa s]	μ_L	0.001

表 6 無次元数の計算結果

	Eo	Mo	Re
油滴	1.086	3.72×10^{-11}	497
大油滴	7.41	4.10×10^{-11}	1963
気泡	3.281	2.29×10^{-11}	1122

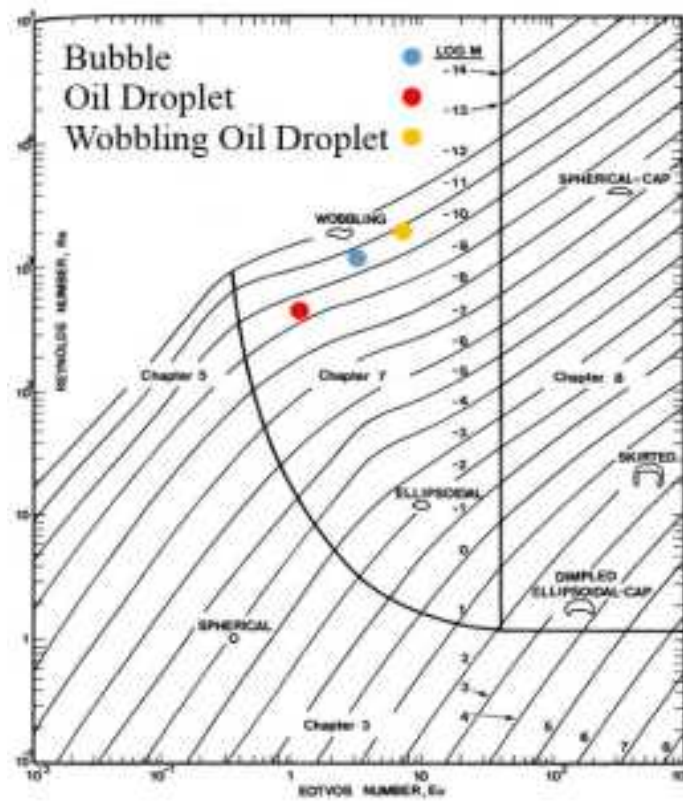


図 3-17 Clift 線図上における本実験条件

3.1.9. 気泡内エアロゾル挙動の解析

2 章にて説明した気泡中におけるエアロゾルの流動に関するモデルは基本的に界面における流速から除染係数を導出している。しかしながら、内部流動を知る上で界面の流動だけでは必ずしも十分とはいえない。そこで使用するのが 3.1.2 章で説明した Hill's Spherical Vortex である。ここで示される流れ関数は一様流中にある真球形状をした流体の流れを示す。この考え方をを用いると気泡を真球、周囲流体は純水であり、スリップはないと仮定した時に一定速度で上昇する気泡の内部流動を計算することができる。旋回運動の値は、 DF に対しては遠心力を引き起こす要因である V_s が該当する。計算に試用した値の根拠としては実際の 3 mm 直径のノズルから放出された気泡に対してエクспанセル粒子と同様の物性を持った粒子の値を使用している・実験において使用した気泡の等価直径 $\gamma_c = 8 \text{ mm}$ 、外部流速 $U = 0.22 \text{ m/s}$ 、内部の粒子径 $D_p = 0.01 \text{ mm}$ 、粒子の密度 $\rho_p = 1000 \text{ kg/m}^3$ 、空気の密度 $\rho_f = 1.205 \text{ kg/m}^3$ 、空気の粘度 $\eta = 1.822 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、重力加速度 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ として計算する。

空気中における微粒子の重力沈降に関してはストークスの式により式(8)のように示すことができる。また、遠心力による速度 V_c に関しては以下の式(9)のように表される。

これらをたし合わせ、3.1.2 章の式(4)における Hill's Spherical Vortex の流れ関数の x 方向と y 方向成分に対して、重力項と遠心力項の遠心力項成分をたし合わせると以下の式(10)のように表すことができる。なお、微小時間は 0.00001 s とし、ブラウン運動や凝縮に関しては無視するものとする。

式(10)を元に実際に計算を行ったものを図 3-18 に示す。流跡線の始点は $(x,y) = (0,3) \text{ mm}$ から始め、流跡線を追った。赤線で表されるのは粒子に質量がない場合の流跡線であり、Hill's Spherical Vortex による流動を再現している。緑の線は遠心力と重力沈降により粒子が徐々に気泡から外側に渦巻きながら向かっていく様子が計算結果として確認できた。これは、実際に MELCOR や SPARC-90 などのモデルにおいて言及されているものと一致する。図 3-18 においては始点の位置の都合上界面からの離脱の前に計算がオーバーフローしてしまうため、図 3-19 において改めて $(x,y) = (0,3.96) \text{ mm}$ から流跡線の計算を行った。ここから粒子が気泡の界面を抜けて外に出て行く様子まで確認できた。

以上より、Hill's Spherical Vortex を元にエアロゾルの輸送を考えることで、エアロゾルが界面を通過して周囲流体へ移行する挙動、つまり除染とみなせる挙動を評価できた。すなわち、Hill's Spherical Vortex を元に行っている MELCOR においても、原理的に除染を評価可能であると考えられる。

$$V_{g,i} = -\frac{D_p^2(\rho_p - \rho_f)g}{18\eta} \quad (8)$$

$$V_{c,i} = -\frac{V_s^2 V_g}{r_c g} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} x &= (u + V_{g,i} + V_{c,i} \sin(\varphi))\Delta t \\ y &= (v + V_{c,i} \cos(\varphi))\Delta t \end{aligned} \quad (10)$$

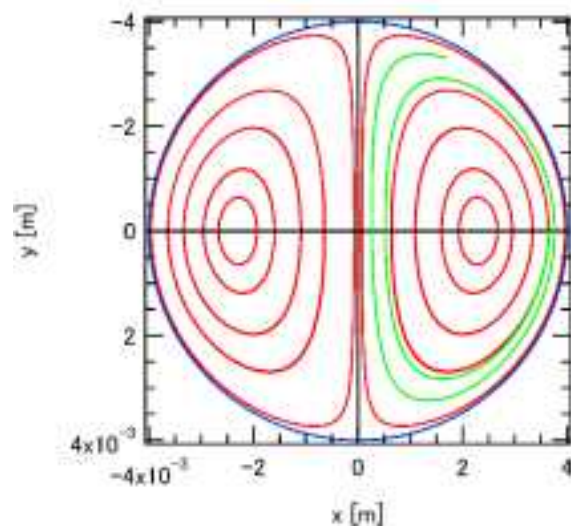


図 3-18 真球中のエアロゾル挙動

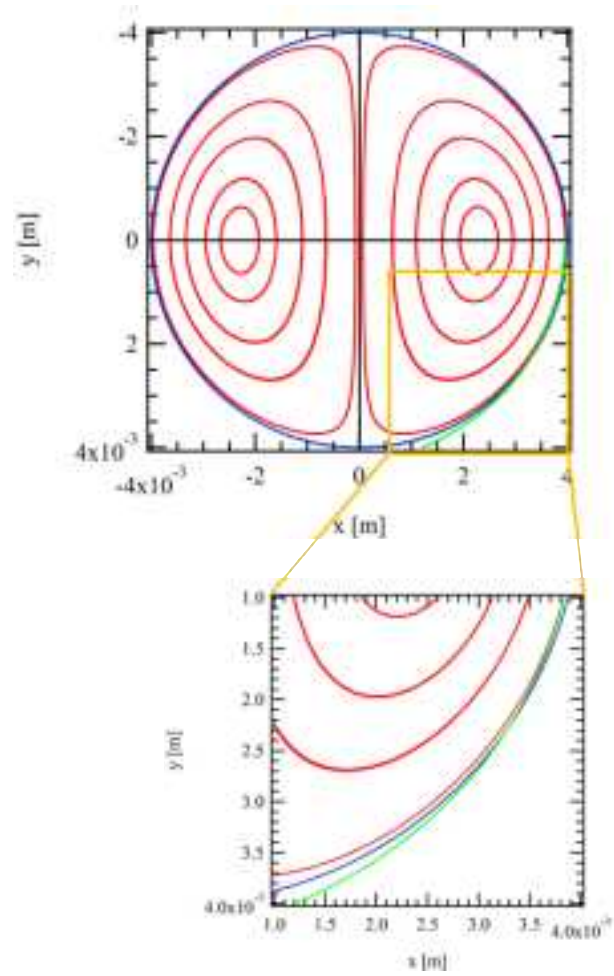


図 3-19 真球からのエアロゾル離脱

3.1.10. 気泡中のエアロゾル挙動

3.1.10.1. ノズル出口付近における挙動

3.1.3 章に示す装置を用いて実際に気泡中のエアロゾル挙動を可視化する実験を行った。以下の図 3-20 においてノズル直上におけるエアロゾル挙動可視化画像を示す。エアロゾル粒子には親水性シリカ粒の OX-50 を利用した。画像は 6400 frame/s, シャッタースピード 1/6400 s, 画像のサイズは 768×768 pixel, F8 で行い, 100 枚分の画像を用いて平均値をとった。

可視化画像からは、気泡の中央付近において内部の粒子の散乱光が可視化されているのが分かる。画像の前部には粒子の影のようなものも見られるがこれは、シートレーザーの範囲から外れた粒子が写りこんでいると考えられる。ノズル出口付近では画像から向かって時計回りの流れが観察された。これは、本実験において使用しているノズルが L 字であるため、ノズル湾曲部の外側の流速が内側の流速より速い状態でノズル先端から出てくるからだと考えられる。0.025 s の画像ではエアロゾルの界面における散乱光によると見られる光点も見られた。

蛍光粒子を用いた実験の結果を図 3-21 に示す。エアロゾル粒子には FLUOSTAR を利用した。画像は 6400 frame/s, シャッタースピード 1/40000 s, F2.8 で行い, 画像のサイズは 768×768 pixel で行い, 100 枚分の画像を用いて平均値をとった。蛍光粒子を用いた実験においては当初の狙いの通り界面における散乱光を除去することができた。また、散乱光を用いた実験と同様に画像から向かって時計回り方向の流れが観察できた。一方で、気泡界面付近において粒子による内部反射のような光も確認された。

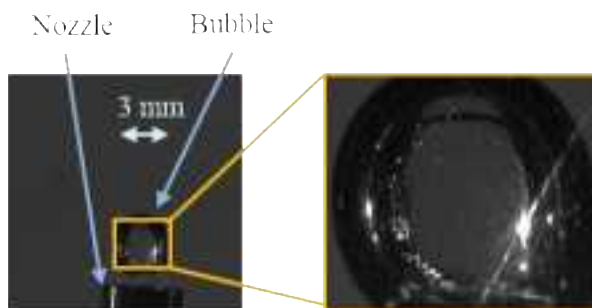


図 3-20 ノズル出口真上におけるエアロゾル散乱光の可視化

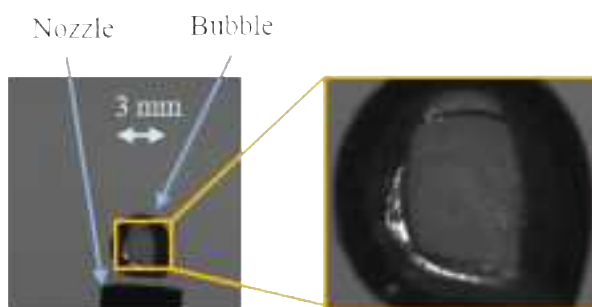


図 3-21 ノズル出口直上におけるエアロゾル蛍光発光の可視化

3.1.10.2. 気泡上昇時の 2D3CPIV 結果

エクспанセル粒子を使用したエアロゾルによって上昇単一気泡を生成することで内部流動の可視化を行った。図 3-22 と図 3-23 において示すのは、単一気泡実験装置によって撮影された単一気泡の上昇画像である。画像は 4000 frame/s, シャッタースピード 1/6400 s, 画像のサイズは 768×768 pixel, F16 で行った。なお、画像中では気泡の上昇は大きくないがこれは単一気泡実験装置の上下動装置を利用して気泡を物理的に追従、撮影しているからである。画像から分かるように界面の揺らぎが非常に大きく気泡が細長く変形している様子が確認できる。これは、図 3-17 において示した Clift 線図中において気泡が *wobbling* 領域にあることを反映している。画像からは界面付近に付着している粒子や散乱による光点も見られる。

気泡に対して三次元 PIV をかけた画像を以下の図 3-24 に示す。気泡内に対する PIV ではベクトルの方向に連続性が見られず、ほとんどのベクトルが正しくトレーサ粒子の散乱光を追えていないエラーベクトルであると推察することができる。

図 3-24 において PIV ソフトにて処理した PIV の結果は 3 次元のベクトルを 2 次元の画像で構成するために分かりやすくするためのものであったが、より正確に三次元的な流れを捉えるためにベクトルを三次元的に描画するソフト(CYBERNET 社製 MicroAVS)を使用した結果を図 3-25 に示す。左側面図を見ると左右両方向に対して奥行き方向に向かうベクトルが観察されたが、指向性は見られなかった。ここからも、本実験において PIV 実験が内部の粒子ではなく界面に付着した粒子や気泡の界面に見られる散乱光を主に観察していると推察することができる。

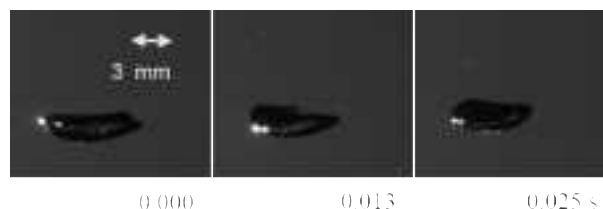


図 3-22 気泡上昇時の追跡画像 カメラ 1

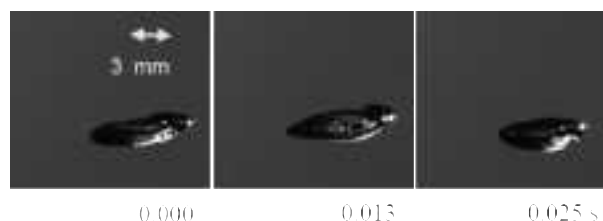


図 3-23 気泡上昇時の追跡画像 カメラ 2

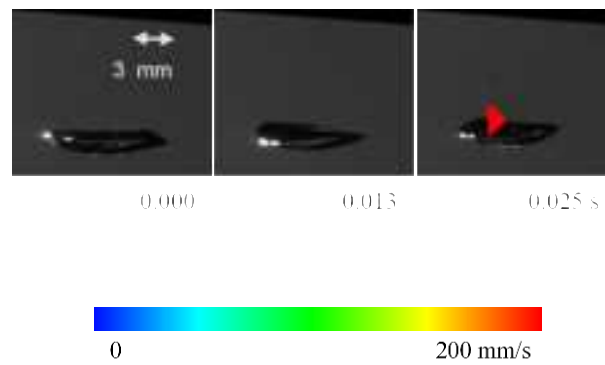


図 3-24 気泡上昇時のステレオ PIV 結果

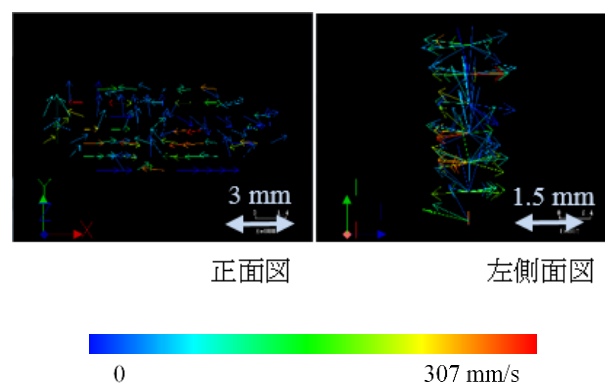


図 3-25 気泡に対するベクトルの三次元図

3.1.10.3. 気泡内の可視化に関する光学的考察

本実験において使用した気泡に対して撮影を行った画像を以下の図 3-26 に示す。気泡と油滴を撮影した際に観察される光は i)バックライトの透過光, ii)粒子の散乱光という二つに分類されると考えられる。

一つ目のバックライトに関して、気泡は中心の一部を除き全面に渡って光が透過せず真っ黒な状態である。

二つ目の粒子に関しては、気泡では中心や下部にて堆積するような形でエアロゾルの散乱光が観察された。また、気泡内の一部ではぼやけた光も観察できた。粒子の観察できる範囲はバックライトの透過している範囲よりも外側までであった。

以下に気泡における粒子の散乱光に対して考察を加える。バックライトの透過光と粒子の散乱光の通る光路はそれぞれ以下の図 3-27 に表される。空気と水の屈折率を比較すると空気は 1.000, 水は 1.333 というように差が見られる。気泡は二つの凹レンズとして捕らえることとすると、バックライトは凹レンズを二枚、エアロゾルに散乱した光は凹レンズを一枚通る光学系と考えることができる。

図 3-28 に示すのはバックライト光が気泡を透過する際に辿る光路を示した模式図である。図のように、二枚の凹レンズを通ることで光が大きく拡散していくと考えられる。2 枚の凹レンズの間には赤の斜線と黒の斜線で塗られた部分はそれぞれ気泡中の光がカメラの撮影範囲に届くものと届かないものを表している。以下のような原理によって気泡を透過したバックライト光がカメラに届く範囲が限定されていると考えられる。

市販の RayTrace という光路計算ソフトウェアを用いて長軸 6 mm, 短軸 3 mm を透過するバックライトの光路を計算した。結果を図 3-29 に示す。気泡とカメラの間を現在の装置で取れる最短距離である 170 mm として計算すると中心の一部以外は透過しないという計算結果となった。これは図 3-26 において述べた可視化結果と一致する。

図 3-30 に気泡内にあるエアロゾルが結像する際の光路を示した模式図である。粒子は黒い矢印で表され、凹レンズを一つ透過することで緑の矢印で表される正立虚像をつくる。実際にはカメラなどに使用される光学凹レンズはこれらの収差が最小限になるように設計されているが揺動が激しい気泡の界面はこのような条件を満たさない。

図 3-29 で表した光路計算と同じ条件にて気泡内のエアロゾルから発せられる散乱光の光路を計算したものを図 3-31 に示す。計算では気泡の中心から高さ方向に 1 mm 程度上昇した位置にある微粒子を仮定する。図中の青線が粒子からの散乱光、赤線を気泡界面で屈折した光の光路とする。図からわかるように屈折光は一点に収束することない。つまり、実際にカメラで撮影した場合はぼけた状態で撮影されると考えられる。この計算結果は図 3-26 において述べた可視化結果と一致する。

これらの結果を元に、Clift の線図において wobbling するような気泡の内部を可視化する際

には屈折やそれに起因するボケなどの問題を解消する必要があると考えられる．これらの問題を解消するには I)周囲流体と内部流体の屈折率が小さい環境で可視化を行う，II)気泡の wobbling を抑える，III)ボケから内部粒子を逆算するなどの対策が考えられる．



Transparency range of backlight

図 3-26 気泡画像の一例

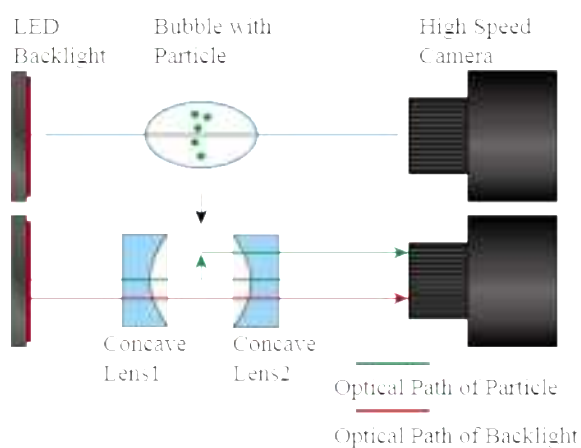


図 3-27 エアロゾル散乱光とバックライトの光路

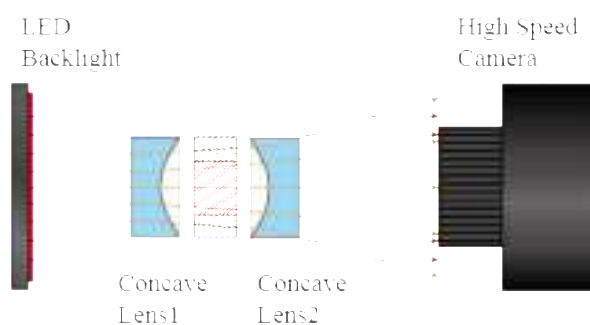


図 3-28 バックライトの光路

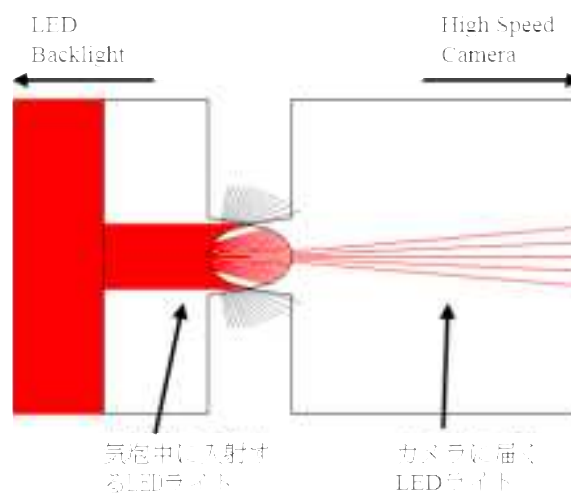


図 3-29 バックライトの光路計算

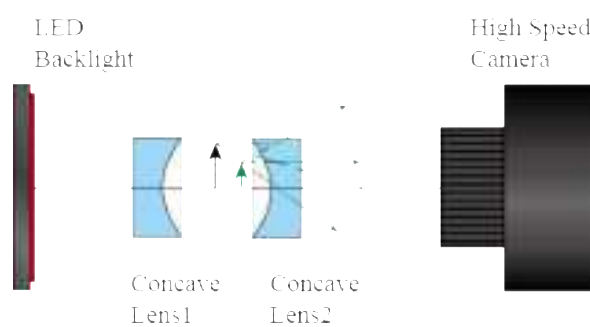


図 3-30 エアロゾル散乱光の光路

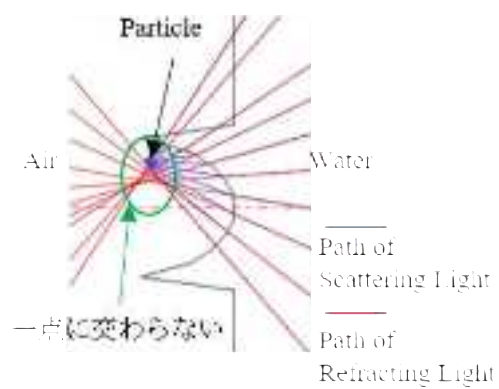


図 3-31 エアロゾル散乱光の光路計算

3.1.11. 油滴中の微粒子挙動

3.1.11.1. 上昇する油滴に対する PIV

上昇油滴の実験においては気泡に見立てたシリコンオイル中に粒子を混入し，内部の粒子挙動を観察した．これは，実験の趣旨としては 3.1.10.3 章において考察した **wobbling** する気泡の内部を可視化する手法の i) 周囲流体と内部流体の屈折率が小さい環境で可視化を行うという条件あたる．

図 3-32 に示すのは 3 mm ノズルより放出した油滴の上昇を撮影した画像である．画像から，図 3-17 の Clift の線の位置関係からも分かるように気泡に比べて形状が安定した状態で上昇した．

図 3-33 に示すのは 2 次元 PIV を行った際に得られる微粒子挙動の平均値の速度ベクトルである．画像中の矢印の向きが速度ベクトルの方向，色が流速を表す．油滴から大きく外れた場所にも速度ベクトルが見られる．これは上昇する油滴を追従せずに撮影しているものの，背景に示されている画像は初期状態の油滴のみを写しているからである．

図 3-32 の結果から，図 3-33 に示す速度ベクトルの垂直軸方向に対して -5.38 mm, -7.17 mm, -8.96 mm のそれぞれの点において水平軸方向に速度の絶対値の分布をとったグラフを図 3-34 に示す．図から分かるように，どの領域でも油滴の中央に当たる 6 mm 付近において流速の特徴的な立ち上がりが見られることが分かる．画像は 4000 frame/s, シャッタースピード 1/6400 s, 画像のサイズは 768×768 pixel で行い，100 枚分の画像を用いて平均値をとった．

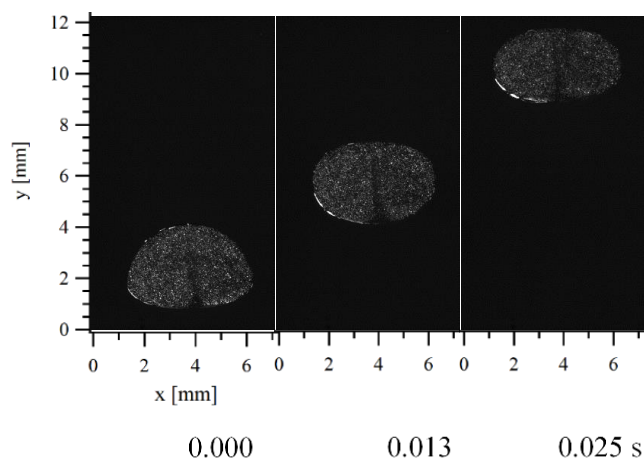


図 3-32 上昇油滴の可視化結果

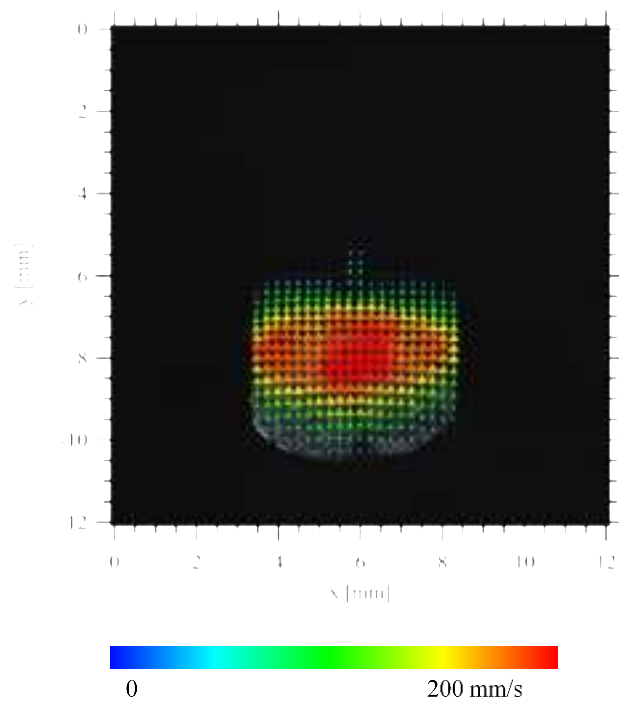


図 3-33 上昇油滴中の流速平均

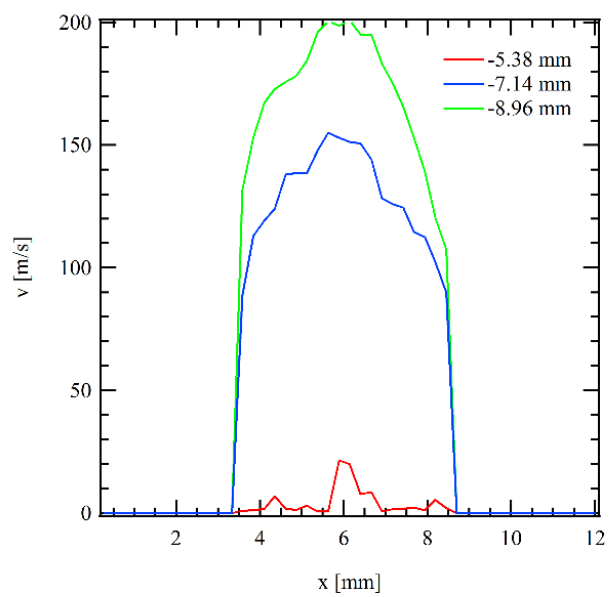


図 3-34 上昇単一気泡中の速度分布

上記の結果をもって上昇単一油滴内の中央付近に特徴的な流れが存在することが分かった。この特徴的な流れは、油滴自体の上昇速度に対して、油滴の中央付近に立ち上がるように観察されたため、気泡内を上昇する流れと考えられる。逆に、気泡内を下降する速度も存在すると予想される。しかし、これらのオーダーよりも油滴自体の上昇が非常に速いため、画像の可視化結果からは気泡内流動の特徴をつかむことができなかった。そこで、画像の可視化結果から油滴の上昇速度を計測するプログラムを作成した。油滴の画像の特徴としては、バックライトが界面で屈折しにくいために油滴界面の輪郭を観察しにくい。そのため輪郭抽出による界面計測が十分に適用できない。そのため、気泡の重心位置を検出する際に通常使用する気泡の輪郭から重心の情報を抽出するプログラムが作成できない。そこで、油滴内を粒子が均一に分布しているという性質を利用し、以下のような方針で重心検出プログラムを作成した。1) 画像に対してメジアンフィルターをかけることで不要な粒子を除去 2) ガウシアンフィルターを用いて全体をぼかす 3) 二値化し、白抜きした部分の面積分布から重心を検出。ガウシアンフィルターを介することによって、粒子の径のばらつきを防ぐことができる。具体的な実行内容を以下の図 3-35 に示す。

図 3-36 は画像にして 100 枚分、0.025 秒間隔の間に油滴が上昇する画像の重心座標の移動を示す。縦軸が油滴の上昇方向、横軸が水平方向を表す。重心の軌跡から気泡が上昇する際のジグザグ運動が観察された。

以上に説明した重心検出プログラムを使用して油滴の画像内における重心座標から、気泡重心の位置が一番目の画像に固定されるように変換を行った。図 3-37 には重心検出プログラムによる座標変換の実行結果を示す。元画像には図 3-32 の画像を用いた。画像から見て取れるように、気泡の上昇が止まるように変換できた。

重心検出プログラムの結果を利用して、図 3-37 で使用したものと全く同じ画像に対して再び PIV 処理をかけたものが図 3-38 に示す画像である。結果からは上昇成分を差し引いた状態でも油滴の中央部分に上向きの流速が見られることが分かる。さらに、中央から外れた部分では流速は小さいものの油滴の外側や下向きに向かうような速度成分も見られた。

図 3-39 に示す画像は画像処理後の油滴に対してかけた PIV の平均値をベクトルで表したものである。この結果に対してそれぞれの高さ方向の位置で水平方向に見られる流速の絶対値を縦軸にプロットしたのが図 3-40 のグラフである。

画像から分かるように、油滴の下層部分にある流速分布には流速のピークのようなものは見られない。しかしながら、10.24 mm 以降の部分では気泡中心の流速と界面にいたるまでの部分では明らかに流速が異なることが分かる。一方で、油滴自体の上昇速度を計算すると約 111 mm/s と、今回見られたどの部分の流速もこれに満たなかった。界面付近の流速が小さい理由の一つ目に、PIV 計測を行う際にかけたマスクで界面直上の成分を拾わないようにデータがプロットされていないからである。これは、気泡界面付近の流動は屈折率の影響でエラーの多いデータとなってしまうためである。また、周囲流体の汚れや内部の粒子などにより油滴界面との間にスリップが発生し、これによって内部流動も遅くなったことも考えられる。

図 3-37 で使用した画像を二値化した後、100 枚を合成した画像を以下の図 3-41 に示す。白い連続した線を流跡線と考えられる。流跡線からは、右に並べた既存解析コードのモデルにおいて考えられているような旋回運動のようなものが観察された。一方で、モデルでは言及されていないような小さな渦が発生しているのも見られた。この運動は特に油滴の揺動が大きい頂点付近に見られるため、界面の変形運動と何らかの関係があると考えられる。

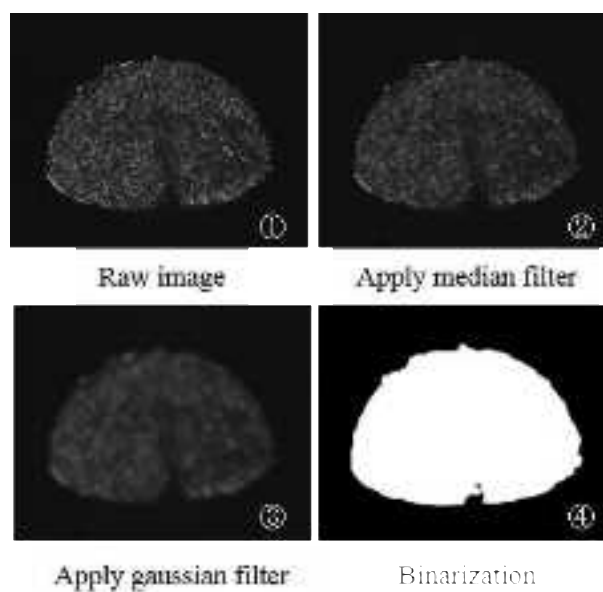


図 3-35 重心検出プログラムの実行内容

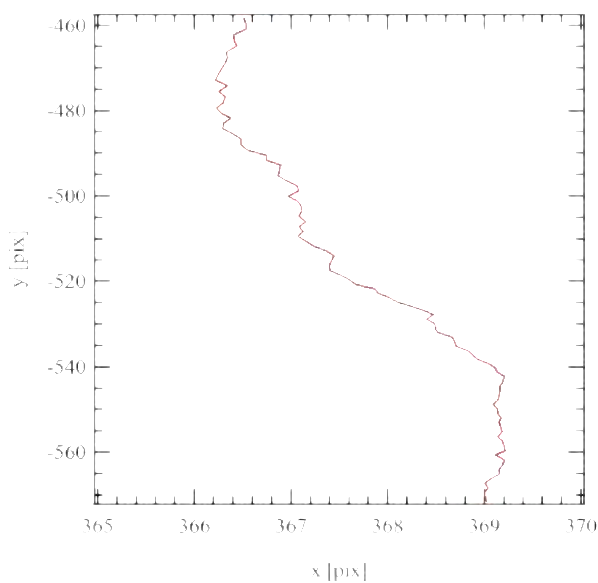


図 3-36 油滴の重心座標

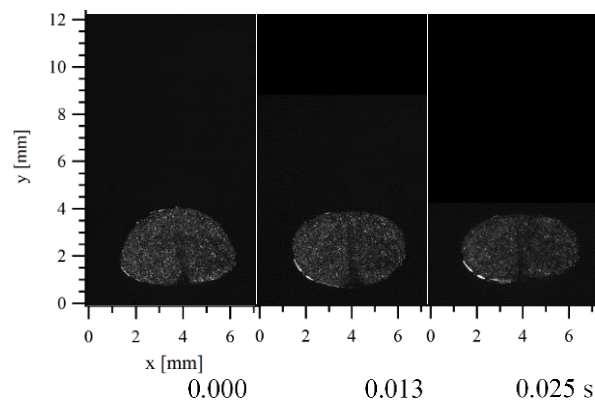


図 3-37 上昇油滴の重心位置を一定にした画像

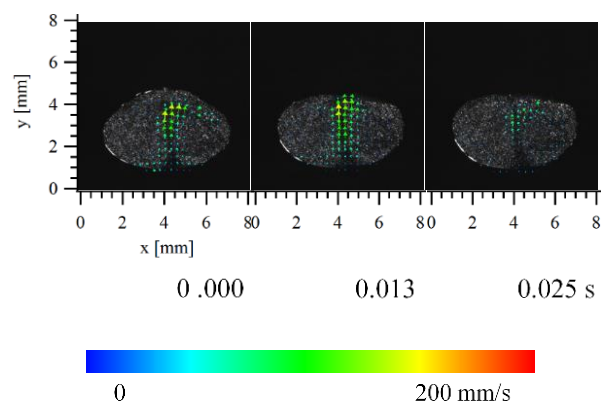


図 3-38 画像処理後の油滴中の PIV 結果

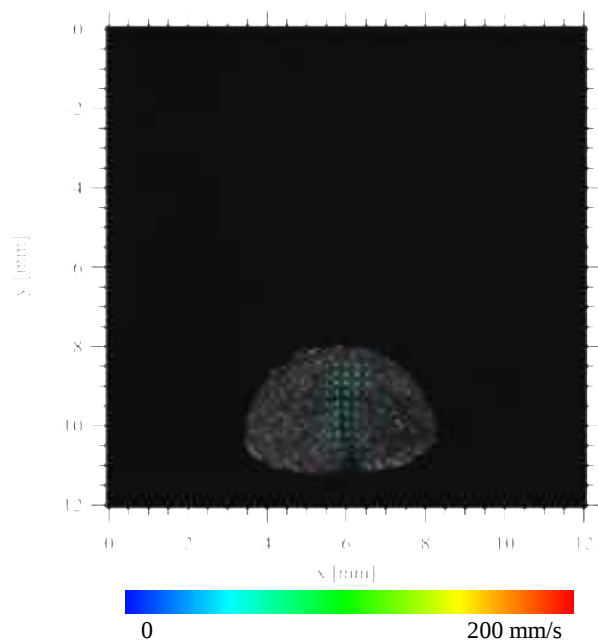


図 3-39 画像処理後の上昇油滴の流速平均

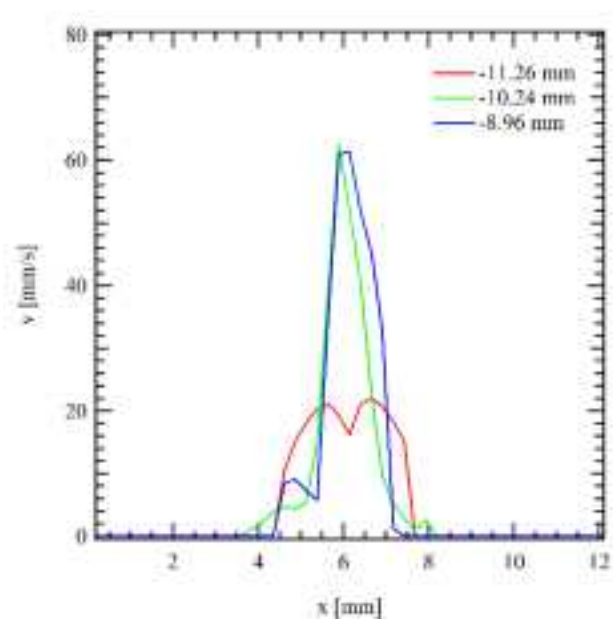


図 3-40 画像処理後油滴中の流速分布

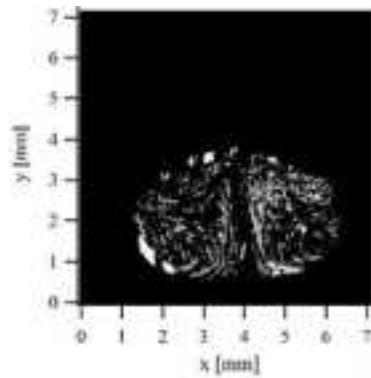


図 3-41 油滴中の流跡線

3.1.11.2. Wobbling する油滴に対する PIV

上記における油滴は 3.1.8 章において示す Clift の線図では気泡から比較的遠い位置にある、安定した条件での計測であった。そこで、より気泡に近い条件で可視化計測を行うことを目的として内径 10 mm のノズルを使用して油滴を射出することで大油滴を生成する。この大油滴は上昇速度、等価直径の二要素が大きい事により式(5)、(6)から分かるようにいずれも Re 数と Eo 数が大きくなる方向に向かう。

上昇する大油滴を撮影した画像を以下の図 3-42 に示す。図 3-32 に示す 3 mm ノズルから生成した油滴と比較してより変形が大きいことが分かる。

上記の画像に対して PIV 処理をかけたものを図 3-43 に示す。なお、上昇する際の背景画像を検出、消去することで周囲のエラーベクトルを減少した。上昇するに従い、油滴の中央部分に存在する流速成分の分布や大きさが変化していくことが分かる。

図 3-37 と同様に上昇画像に対して気泡の静止系に治るように画像処理を行った PIV 結果を図 3-44 に示す。画像からは気泡に向かって右側と左側の位置に 2 つの渦が確認された。流動に関しては特に中央の立ち上がりの部分における流速が時間ごとに顕著変化した。また、立ち上がり部分の流速方向も鉛直上向き方向に対して傾きが見られた。これは静止系から見た際の図 3-43 の結果でも反映されているため、重心検出による画像処理の影響であるとは考えにくい。

図 3-45 に示す画像は画像処理後の油滴に対してかけた PIV の平均値をベクトルで表したものである。この結果に対してそれぞれの高さ方向の位置で水平方向に見られる流速の絶対値を縦軸にプロットしたのが図 3-46 のグラフである。グラフからは wobbling の少ない条件で取られた図 3-40 のグラフとは違い、どの断面の流速においても左右それぞれの界面における速度と、中央部分にピークが見られた。全体としては速度が大きくなったが、特に中央部分は大きく広がっていることが分かった。この中央に見られる流速は油滴中心付近では大きく、上下方向に向かって小さくなるような分布が存在した。また、界面付近においては界面の動きと連動した下向きの流動が見られた。

図 3-42 に示す画像に対して図 3-41 に示すように流跡線を表示したものを以下の図 3-47 に示す．内部では図 3-4 に示すような単一気泡中で予想される旋回運動のようなものが見られた．また，油滴の底面側にも渦が見られた．これは油滴の後流の剥離渦により内部流動が誘起されている，または油滴の伸縮によってなされたものだと考えられる．

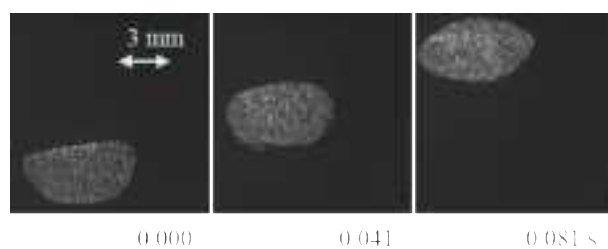


図 3-42 wobbling する大油滴

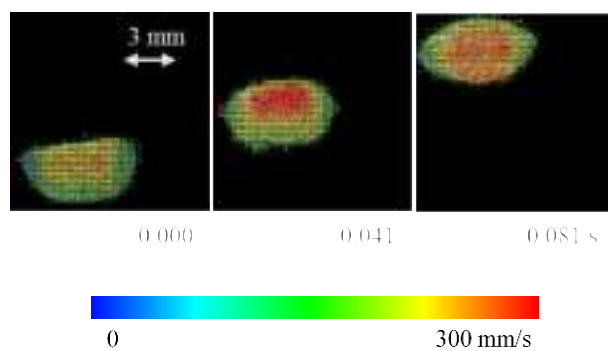


図 3-43 大油滴に対する PIV 結果

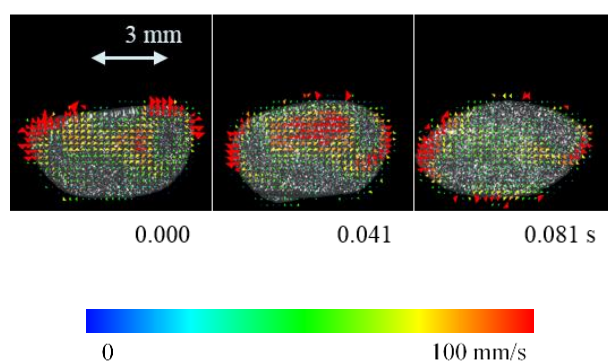


図 3-44 揺動油滴の静止座標系から見た PIV 結果

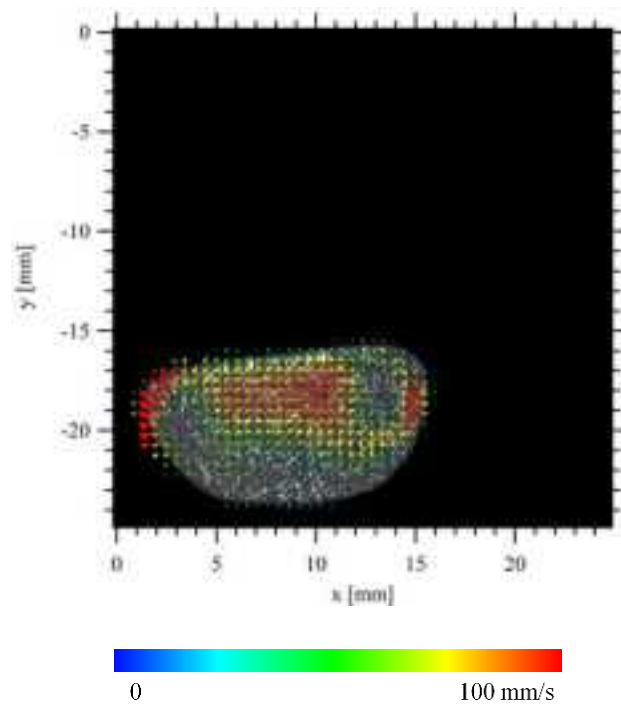


図 3-45 画像処理後の大油滴の流速平均

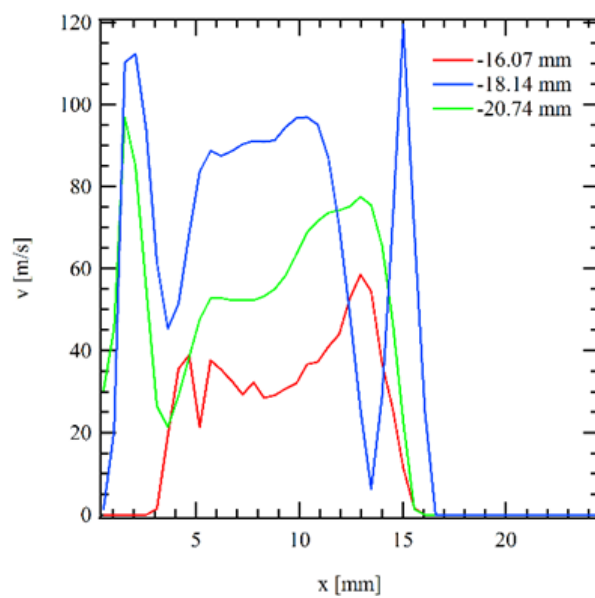


図 3-46 大油滴内の速度分布

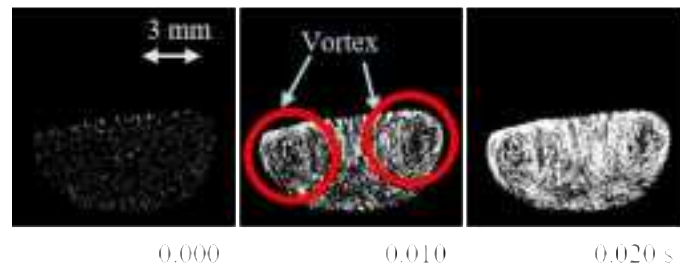


図 3-47 wobbling する油滴内の流跡線

3.1.11.3. 上昇する油滴に対する 2D3CPIV

単一油滴で行った結果を利用して三次元 PIV を行った. 油滴に対してそれぞれカメラ 1 とカメラ 2 による画像を以下の図 3-48 と図 3-49 に示す. 油滴の界面と粒子の見える部分に差があるのが見られる. これは, 油滴の揺動により中心部分のみにシートレーザーが当たっているからである. 一部, 画像の右側や左側でボケが見られる. シャインプルーフの法則に従えばこのようなことは通常起きないが, 本実験ではカメラキャリブレーションをノズルに対して行うためこのような誤差が生じていると考えられる. 画像に対しては図 3-37 で使用したような重心検出プログラムを用いて油滴の重心位置が一定になるように撮影を行った. 画像は 4000 frame/s, シャッタースピード 1/6400 s, 画像のサイズは 768×768 pixel で行い, 100 枚分の画像を用いて平均値をとった.

図 3-50 に示すのは油滴に対してステレオ PIV を適用した結果である. 画像からは油滴内の中央において上昇するような流れが観察され, 二次元 PIV の結果を反映できた. 一方で映像全体としてのベクトルの動きは必ずしも定常的とはいえなかった. これは, ステレオ PIV においては 2 枚の画像を重ね合わせるにより, 重心検出プログラムの誤差がより大きく反映されているからだと考えられる. 片側のカメラの重心位置の正確性のみならず, 両側の重心検出の誤差も考える必要がある. また, 油滴の界面や位置が揺動しているため, 粒子の写っている範囲の重心位置が必ずしも油滴全体の重心位置だということができない. これらの誤差が積もった結果が PIV の正確性に影響を及ぼしていると考えられる.

図 3-50 において得られた 2D3CPIV のデータに対して図 3-25 で示すように三次元成分に分解し, 以下の図 3-51 に 0.056 s の際の正面図と右側面図を示す. 右側面図ではモデルで考えられているような旋回運動のようなものが見られる一方で, 右側面図ではモデルでは確認されていなかった奥行き方向への成分も確認できた. ただし, 奥行き方向の流速としては重心検出プログラムでは上下の動きのみが補正できる関係上, 油滴自体の奥行き方向への変位も考えられる. こちらの变位速度に関しても重心移動のプログラムから 4 から 10mm/s と計測されており, 図 3-51 で示す奥行き方向の流動とオーダーが一致する. 一方で, 奥行き方向速度にはある程度のばらつきも見られたため, 油滴の変位以外で何らかの流動は存在すると見られる.

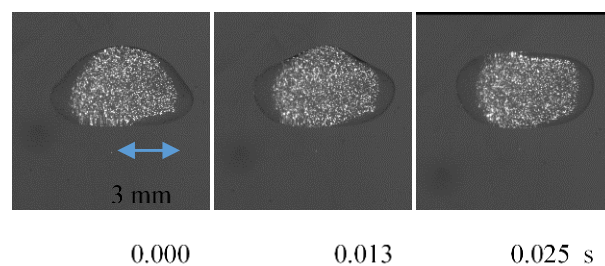


図 3-48 カメラ 1 による画像

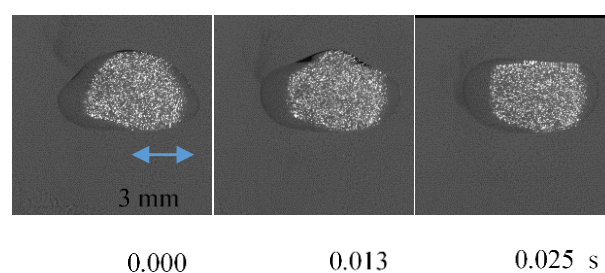


図 3-49 カメラ 2 による画像

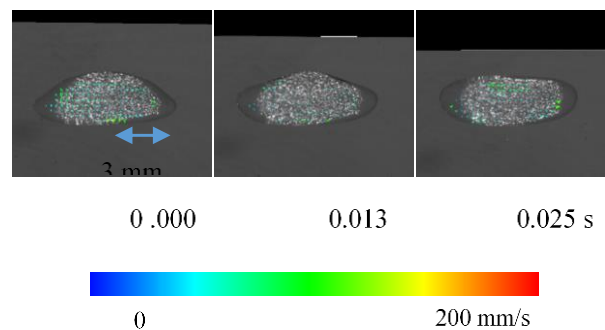


図 3-50 ステレオ PIV による油滴撮影

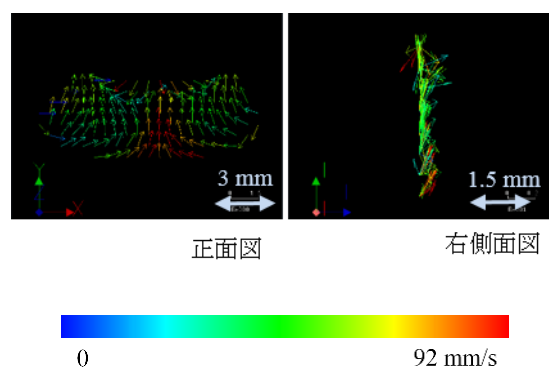


図 3-51 油滴に対するベクトルの三次元図

3.1.11.4. ノズル離脱直後の油滴に対する PIV

既存解析コードにおいて単一気泡の実験結果が使用されるのは気泡が定常的に上昇すると仮定したスウォーム領域のみである。しかし、実際の気泡はノズルから離脱、分裂、合体を繰り返しながら上昇を続ける。このような上昇挙動に対する知見を得るため、ノズルから油滴が離脱する際の挙動を観察した。手法としては二次元 PIV を用いた。上昇油滴がノズルから離脱する際は離脱直後にジェットが観察されるため、画像処理により油滴のみの正しい重心位置を導出することができない。そこで、画像の開始地点を油滴とジェットが 1 pixel 以上はなれた時点から開始するとし、開始点の画像にある油滴の最下点から下の部分にマスクをかけるようプログラムを改造した。流速分布は 4000 frame/s, シャッタースピード 1/6400 s, 画像のサイズは 768*768 pixel で行い、100 枚分の画像を用いて平均値をとった。

可視化結果を以下の図 3-52 に示す。油滴が離脱した時点では定常時に見られたような旋回運動ではなく、油滴が扁平化するのに合わせて内側に向かうような様子が見られた。その後、離脱した部分が凹むことで中央に上向きの流動が生まれ徐々に伸びていく様子を観察した。

図 3-53 に示すのは、図 3-52 において挙げた各画像の y 軸方向の流速分布である。縦軸に y 軸方向の座標位置、横軸にそれぞれの流速の大きさが表されている。また、プロットは全て x 軸方向では 5.86 mm の地点においてなされている。ここからも時間が経過していくごとに速度分布のピークがなだらかに、かつ上向き方向に遷移していく様子が分かる。

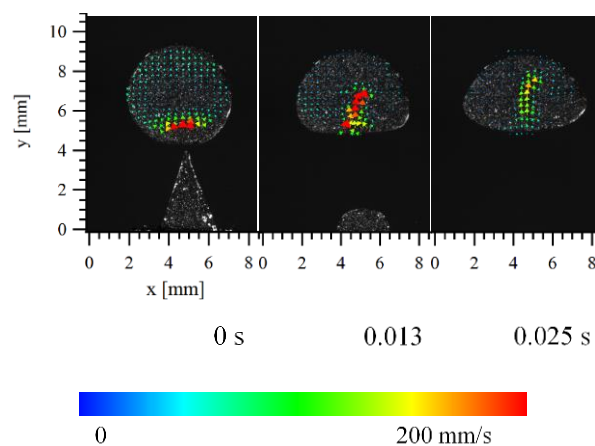


図 3-52 ノズル離脱直後の油滴に対する PIV

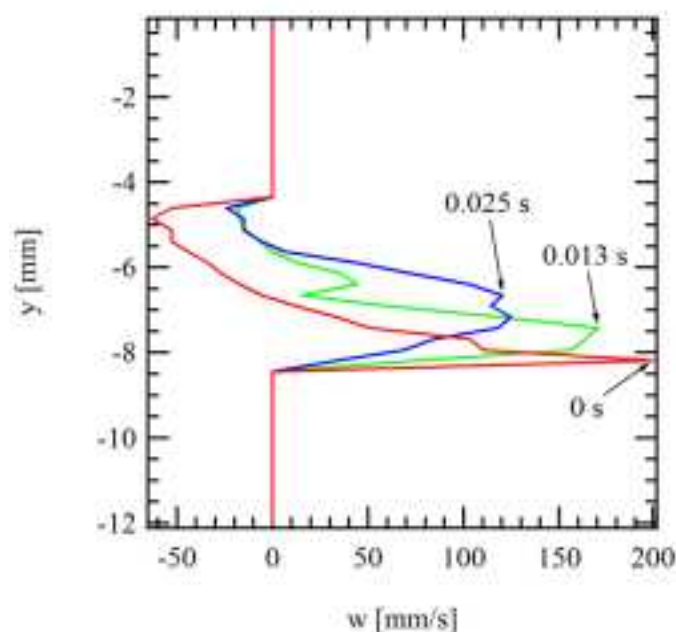


図 3-53 離脱時の垂直方向の速度分布

3.1.11.5. 油滴と気泡可視化結果の比較考察

本実験において使用した図 3-26 で示す気泡に対し、比較として油滴を撮影した画像を以下の図 3-54 に示す。それぞれの物性値はに示されている通りである。

バックライトに関しては油滴においては気泡とは違い、界面近傍を除きほぼ全周においてバックライトが透過している。

粒子の見え方に関しては油滴ではレーザーシート光の当たっていると思われる全ての領域において気泡の内部を観察できた。粒子も界面近傍以外はぼやけた様子はなく、点として結像していた。

上に示す油滴の可視化結果から、屈折率による違いにより気泡の可視化が困難であるという 3.1.10.3 章において示した考察と合致する。

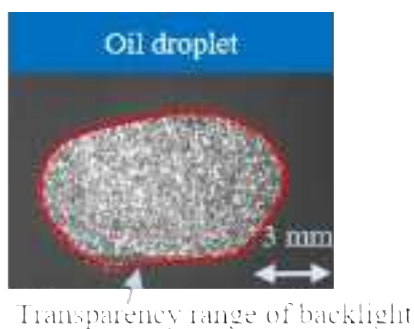


図 3-54 油滴画像の一例

3.1.12. ホログラフィ実験による気泡計測手法の開発

ホログラフィ計測においては i)実験装置の組み立て, ii)光軸あわせ, iii)撮影の三点を行った。

一つ目の実験装置の組み立てに際しては, 気泡の撮影範囲と画角の調整を行うために水槽面とカメラの位置関係を計測した。以下の図 3-55 にカメラの光路長の測定結果と実際に撮影した画像を示す。カメラの光路長を測定する際はまず, 光路に対する最小値を考えた。図 3-16 において示した水槽中心, ミラー2'間の距離が 223 mm, ミラー2', ミラー4 間の区間が 215 mm であるからこれらをたし合わせた 438 mm 以上の光路長をレンズ先端から気泡位置までの間に確保する必要がある。この限界位置にて気泡を撮影した結果, ノズル中央の位置に対して 50×50 mm の撮影面積を確保したため, 以下の地点にてカメラ位置を決定した。

図 3-56 に示すのは撮影された単一気泡の上昇画像である。画像の撮影は 4000 frame/s, シャッタースピード 1/128000 s, 画像のサイズは 768×768 pixel, F1.4 で行った。画像からは干渉によるものと見られる縦縞が見られたが, 気泡を投入したことによる変化は見られなかった。また, 光軸に関しても二つの光路を合わせることはできなかった。原因としては図 3-16 において示すミラー3, ミラー4 間の区間に配置した水槽の構造上, 両端のポリカーボネート板が光路に対して垂直に配置できなかったことが考えられる。水槽の構造を変更することでこのような現象は解消できると考えられる。

ホログラフィ撮影においては原理的に 2 つの光路により干渉した光によって干渉縞が生じる。しかし, 図 3-57 に示すように片側の光路からのレーザー光を撮影した場合も干渉縞が生じていることが分かる。本画像は, 図 3-16 におけるミラー2, ミラー2', ミラー4 を通る光路のみが撮影されており, 撮影条件などは図 3-56 に示す画像と同条件である。この結果から干渉が生じているのは 2 つの光路による干渉の結果ではなく, 光学系の内部に作用によるものと考えられる。可能性としてはハーフミラーの上面と下面における反射防止対策の不足などが考えられる。

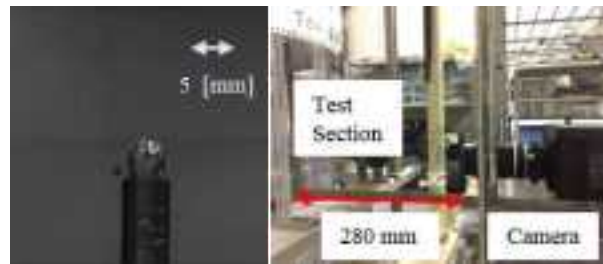


図 3-55 カメラの撮影範囲と光路長の関係

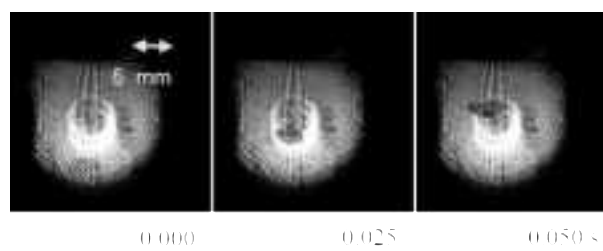


図 3-56 光学系によって生じた干渉縞

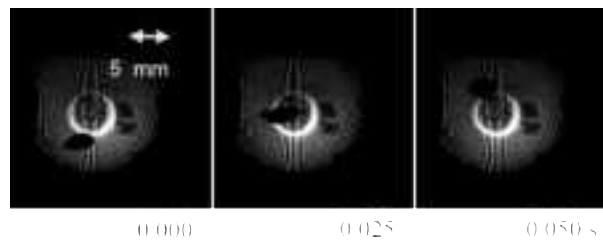


図 3-57 片側の光路のみで発生した干渉縞

3.1.13. 本項のまとめ

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、単一気泡中のエアロゾル挙動の解析、単一油滴中の微粒子挙動の可視化、単一気泡中の微粒子挙動の可視化、ホログラフィ実験による計測手法の開発を行い、以下のような知見を得た。

【単一気泡中のエアロゾル挙動の解析】

1. MELCOR の界面速度評価の元となる Hill's Spherical Vortex モデルを用いて、単一球気泡内のエアロゾル挙動を計算すると、気泡中を旋回しながらエアロゾルが徐々に気泡の界面側へ移行する結果が見られた。
2. 同様に気泡の界面近傍で計算すると、内部のエアロゾルが気泡界面まで到達できることが確認できた。
3. これらの結果から、Hill's Spherical Vortex モデルを元にした MELCOR は、原理的に除染を評価可能であると考えられる。

【単一気泡中のエアロゾル挙動の可視化】

1. ノズル直上ではL字ノズルの湾曲部に向かうような時計回りの流れを観察できた。これは、気泡がノズル上にいる時点から離脱した直後は扁平率が小さいことが要因である。
2. 上昇時の気泡と油滴は、気泡のほうが界面の揺動が激しく、より扁平した様子が観察された。Clift 線図上でも同様の挙動が予測されたことから、物性の異なる気泡と油滴であっても、界面形状や揺動は共通した無次元数で評価できると言える。つまり、同じ無次元数であれば、界面形状や揺動に関して、油滴は気泡を十分に模擬できると考えられる。
3. 蛍光粒子による計測では界面の散乱光が除去された状態で可視化計測を行うことができたが、一方で気泡内の内部反射とみられる光が観察された。

【単一油滴中のエアロゾル挙動の可視化】

1. 油滴が上昇する際に内部で従来のモデルで言及されているような旋回するような流跡線が見られた。一方で、従来のモデルでは見られない小さな渦も見られた。
2. 油滴の三次元 PIV を行い、奥行き方向の速度分布が見られ、モデルより複雑な流動であることが示唆された。
3. Wobbling する油滴においては内部でより速い流動が見られた。また、油滴変形に起因すると思われる流動の変化が見られた。
4. 油滴が上昇する際に、従って徐々に中央の上昇する成分が成長していく様子が観察された。また、成長とともに速度のピークは下がる傾向にあった。これにより、ノズル出口直上では油滴が離脱し、扁平することで内部の旋回運動のトリガーになっていることが示唆された。

【ホログラフィ実験における計測手法の開発】

1. 気泡内の粒子による干渉は見られず、単独の光路のみでも干渉縞が見られた。これ

は、ハーフミラーの内部反射などによって光路長が変化しているからだと見られる。

1.2 気泡の 2 相流挙動評価

本実験では、プールスクラビングにおける 2 相流挙動の把握のため、エアロゾルなし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 2 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の計測するための実験装置を製作し、試験を実施する。表に実験の基本仕様を示す。図に実験装置の概念図を示す。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 2 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。流体条件は大気圧、常温～100℃とし、ガス流量、ガス成分割合等をパラメータとして幅広い条件での気泡の観察を行い、データを採取する。

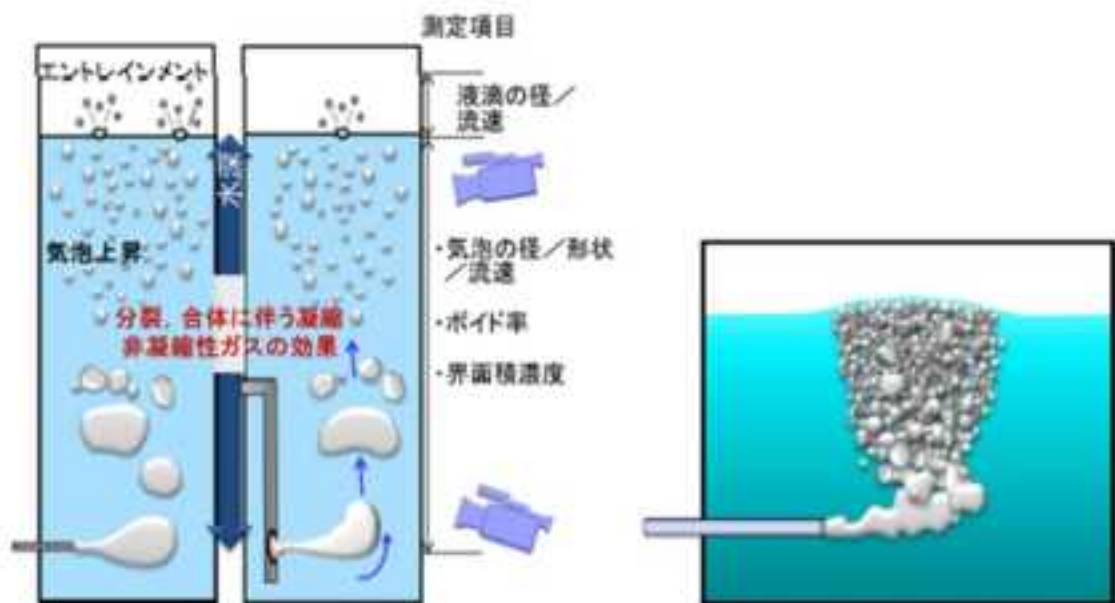


図 3-58 気泡の 2 相流挙動評価実験装置 試験部概念図

表 1.2-1 気泡の 2 相流挙動評価実験基本仕様

項目	内容	備考
装置構成	試験部容器，コンプレッサあるいは窒素ボンベ，ボイラ等	実験部容器の詳細寸法は発生気泡径、スケール則及び壁の影響等を考慮し、実験の計画時に検討すること。なお、装置は対象とする 2 相流の挙動を、ノズル吹出挙動、気泡塊上昇挙動等の詳細把握のため、個別に製作しても良い。
計測機器	高速度カメラ、ボイド率測定装置等	実験計画及び予備実験により最適な機器を検討する。
試験条件	大気圧，常温～100℃	
作動流体	水－空気（窒素） 水－蒸気 （上記 2 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	
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：単気泡相当の流速条件+ ～十分に大きな速度範囲 ・非凝縮性ガス濃度：0～100% ・サブクール度：液温が常温から飽和温度近傍までの範囲（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～2000mm 強	ガス流出速度の上限に関しては、スケール則等を考慮し、実機の流動を模擬できる範囲を検討する。

計測項目 (ただし、今年度においては、一部を要開発項目として検討する)	・ 気泡の径、形状及び流速の分布 ・ 気泡塊（クラスタ又はプルーム）の平均上昇速度 ・ ボイド率分布 ・ 界面積濃度 ・ 界面又は液面から発生する液滴の径及び速度の分布 ・ 2 相流流動様式の特特定及び合体・分裂挙動の把握のための可視化情報 ・ 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）	
--	---	--

1.2.1 実験装置および実験方法

実験装置および実験方法について以下に記述する．実験は昨年度製作した実験装置を使用して行った．以下に概要を示す

1.2.1.1 実験装置の概要

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，エアロゾルなし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の計測及び分類を行う．図 3-59 に実験部の概念図を示す．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 2 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．また除染係数計測のために，試験部入口と出口においてエアロゾル計測を行う．図 3-59 に実験の基本仕様と具体的な計測項目を示す．

上記の計測項目およびコンセプトを踏まえた実験装置の全体系統図を図 3-59 に示す．装置構成は，コンプレッサ，窒素ポンプ，ボイラから気相の供給を行い窒素ガス，空気に関しては蒸気と混合する前に予熱を行う．次に窒素，空気，蒸気を二つに分け一方は，エアロゾル注入部に接続されもう一方は混合部に接続される．分けられた気相は混合部にて合流させて，試験部へと送り計測を行う．試験容器内において，気泡注入ノズルから放出された気泡噴流を可視化撮影，ワイヤメッシュセンサを用いて，ボイド率計測および気泡界面速度計測を行う．計測を終えた，蒸気，窒素，空気，及びエアロゾルを含む気泡は試験部より凝縮器，排水タンクを含む排気系へと送られ安全に処理される．なお試験部への給水は，試験部容器下部から行い排水も同じく行う．また，温度成層条件を実現するために電気温水器およびヒーターを導入することで，水槽下部および，水槽上部より直接給湯を行う．本研究では，図 2.5 に示すように，コンプレッサ及び窒素ポンプ，ボイラーを含む気相供給を行う箇所を気相供給系，エアロゾルの注入及び混合の役割を担うエアロゾル計測器を含む箇所をエアロゾル供給系とし，試験部においては図に示すとおり，単一気泡評価試験部と二相流評価試験部に分岐する構成になっており，二相流試験部について可視化計測，ボイド率分布計測等を行うため水槽容器の仕様検討，製作を行った．二相流評価試験部の概念図を図 3-60 に示す．試験部通過後におけるエアロゾル計測を行う希釈器，計測器を含む箇所をエアロゾル計測系，凝縮器及び排水タンクを含む箇所を排気系，試験部容器へと給水，排水を行う箇所を給排水系とする．それぞれの系統について以下より記述する．

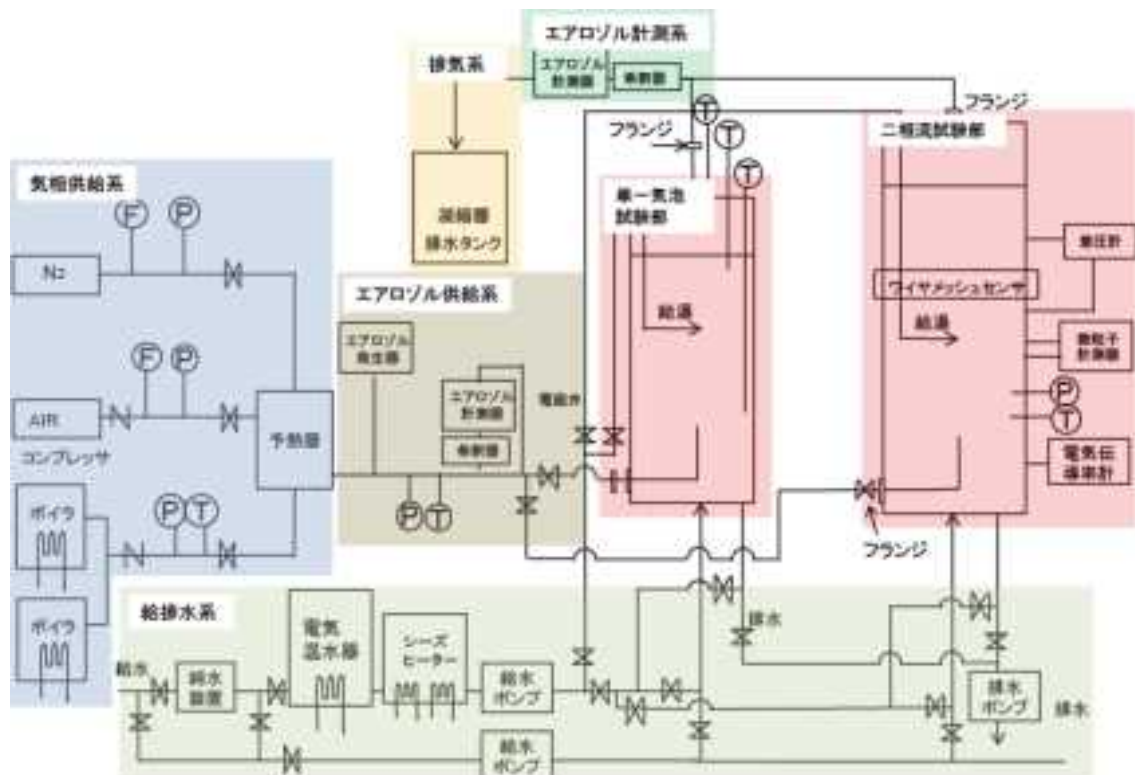


図 3-59 実験装置の全体系統図

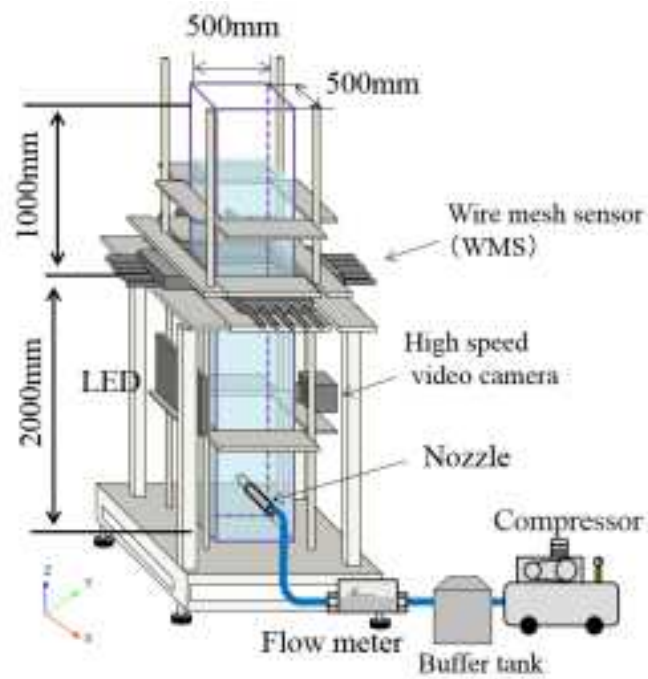


図 3-60 製作した二相流評価試験部

1.2.1.2 エアロゾル計測系

試験部入口及び出口においてエアロゾル計測を行い、除染係数を評価する。導入するエアロゾル計測器の原理については 2.3.5 エアロゾル計測の検討にて詳細を記述する。試験部下流部においては、センサ部を三次元的に駆動させ計測点を変更できるようなトラバース機構を考案した。トラバース機構の概念図を図 3-61 に示す。センサ部の重量が 2.5kg 寸法 250x50x100 (W×H×D) であるため、流路内での稼動域に制限が生じてしまうため、治具との接続は取り外し容易でかつ向きを変更して取り付けることが可能な仕様とした。三次元トラバース機構の主な仕様を以下に記載し、その仕様を満たす製作図面を図 3-62 示す

- ・ PC 上から制御
- ・ 水槽上端から 50mm 上部を 0mm として 50mm 間隔に 5 か所計測
- ・ X 軸:ストローク約 500 [mm]
- ・ Y 軸:ストローク約 250 [mm]
- ・ Z 軸:ストローク約 200~400 [mm]

上記の Z 軸のストロークは水面付近で計測する際の波立ち高さの調整のために使用する。

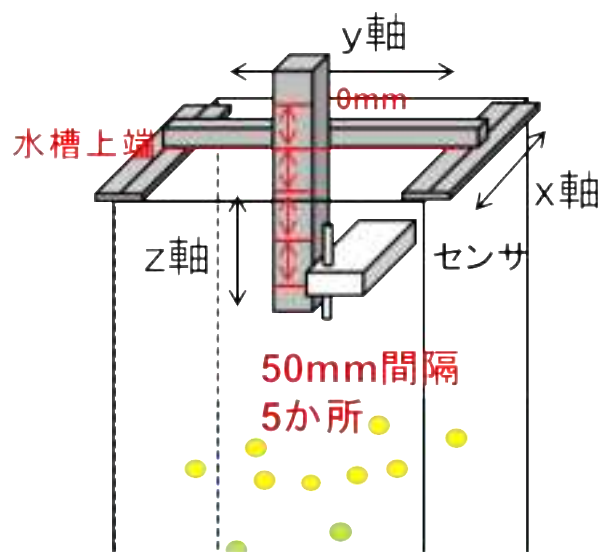


図 3-61 三次元トラバース機構の概念図

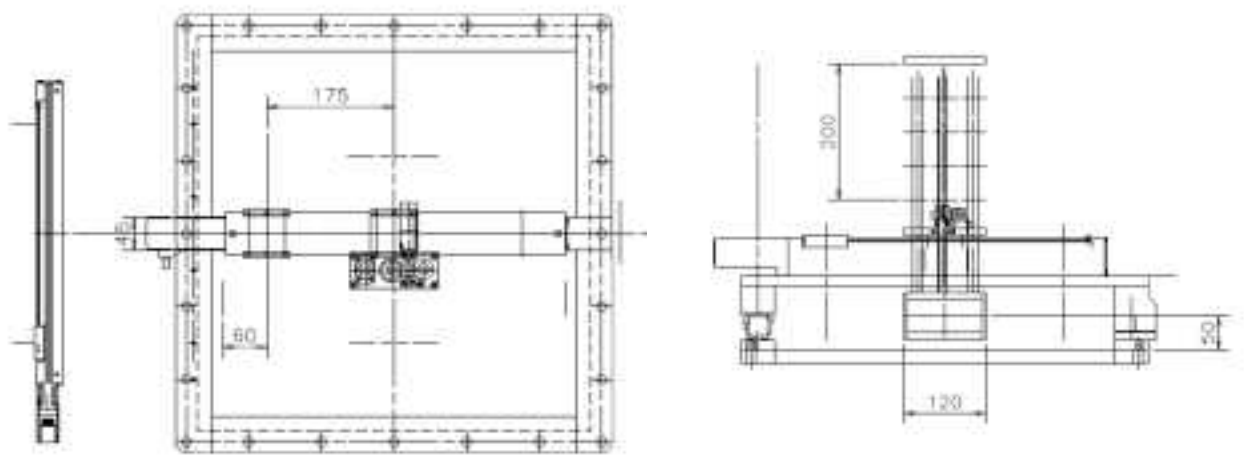


図 3-62 三次元トラバース機構の製作図面

1.2.1.3 給排水系

原子力発電所の事故条件としてベント管から蒸気が流入し続けることでプール部に温度成層が形成され则认为られている。事故時の温度成層を模擬する方法として液相内で温度成層を形成させる方法として電気温水器（TOSHIBA, HWH-F564）を用いる方法を考案した。具体的な形成の手順は図 3-63 のように電気温水器より生成された温水を試験部水槽へ下部から注入し、次に冷水を試験部から下部から低流速で注入する。温水と冷水の温度差による密度の違いを利用した方法であり、関連研究において上記の方法で図 3-64 のように密度成層が実現することが確認されている。また水槽下部に冷水を注入した後、水槽上部より直接給湯する方法も行えるような構成にした。また電気温水器の温度が最大で 60℃までしか昇温できないため、二次加熱系（図 3-65）を電気温水器の後にタンクを設けてシーズヒーターを設置し、追加熱を行うことで水温を 90℃付近まで上昇させる。また様々な種類のエアロゾル模擬粒子を用いて実験を行うため、また純水装置（図 3-66）を設備し、試験に

純水を循環させ続けることで水槽試験部内部を洗浄を行う。

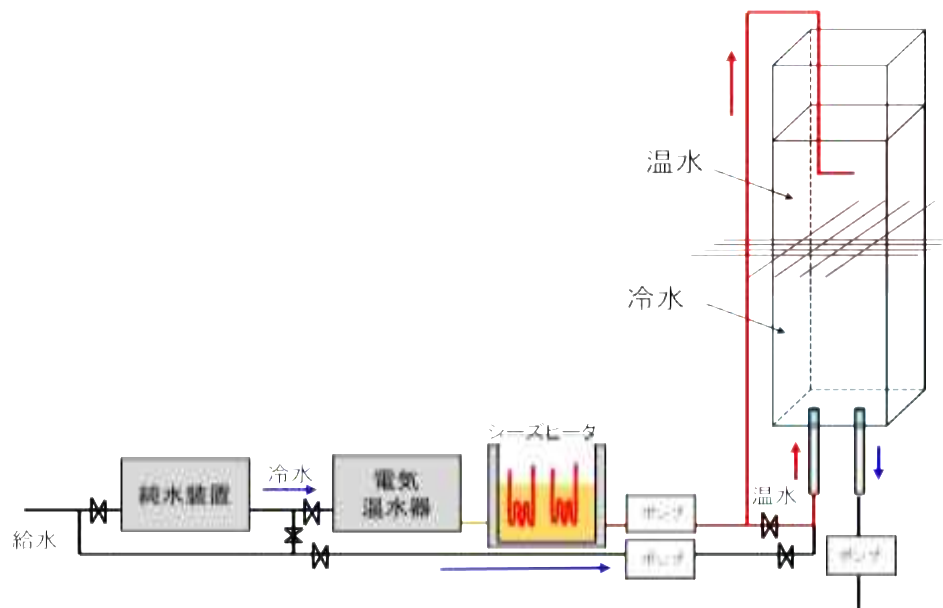


図 3-63 温度成層の実現方法



図 3-64 密度成層の形成

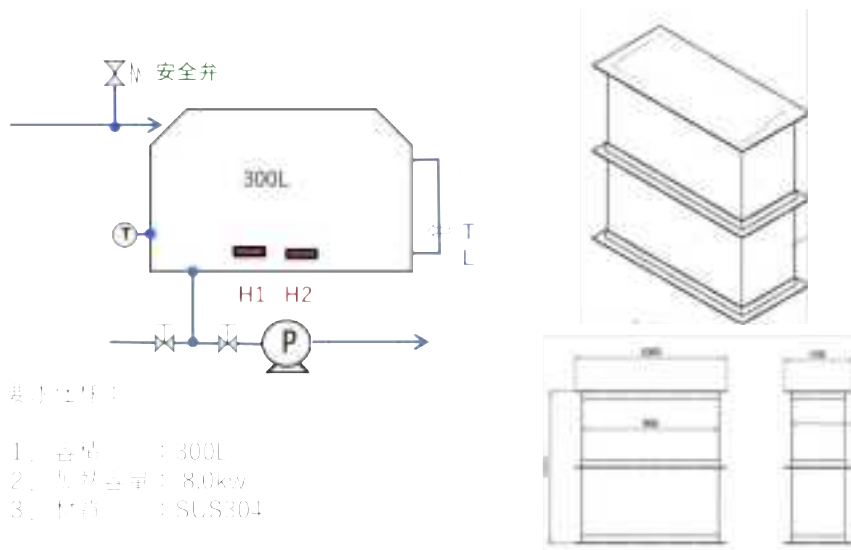


図 3-65 加熱タンク 概略図

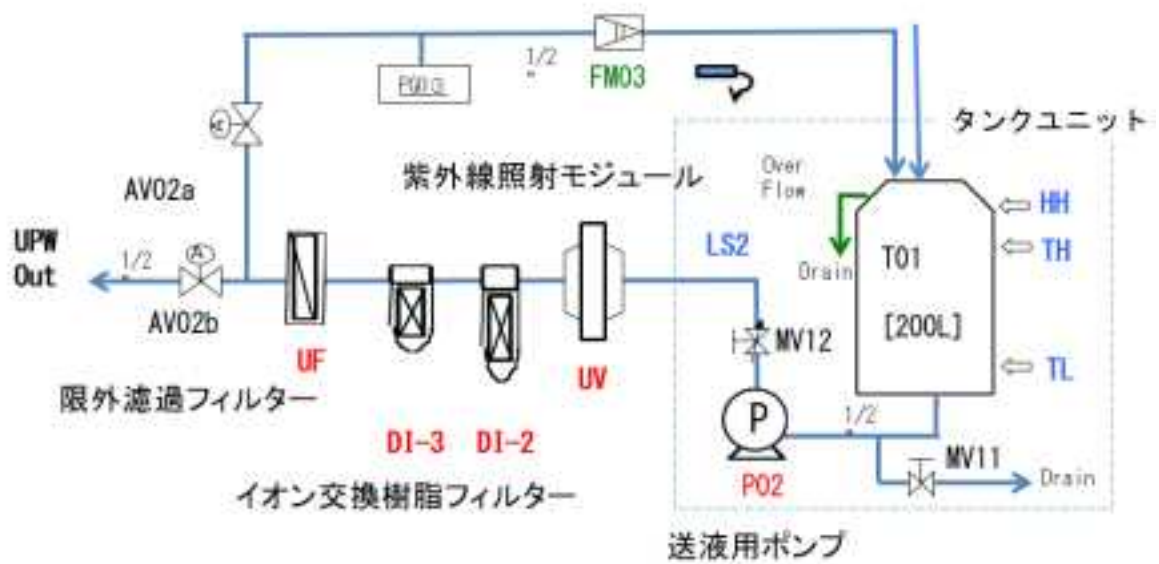


図 3-66 純粋装置の概略図

1.2.2 実験方法

前述の計測項目を取得するために試験部高さ方向に可視化計測をし、下部水槽の上端に設置したワイヤメッシュセンサよりボイド率計測および気相界面速度分布を取得する。また試験部水槽にノズル位置に合わせて、温度計測および圧力計測を行う。圧力計測においては二点間の圧力差を用いることで空間ボイド率を計算しワイヤメッシュセンサより計測したボイド率の妥当性確認を行う。本研究にて行った実験方法について以下に記載する。

1.2.2.4 流動可視化手法

気相噴流の流動構造を把握するために図 3-67 に示すように LED と高速度カメラを使用するバックライト法を用いた。バックライト法は光源とカメラの間に存在する気泡界面での屈折により透過光が減少し鮮明な気泡の射影画像を得ることができる。噴流の断面挙動を把握するため、レーザー誘起蛍光法(LIF)を用いた。LIF は流れ場に適当な波長のレーザーを照射し、励起された流体中の特定物質の蛍光発光から流れ場の情報を得ることができる。実験手順としては、図 3-68 に示すように試験部に水を溜めた後、気相を試験部に注入し、試験部内において静止水中を上昇する気泡群の挙動を観測した。気相はコンプレッサ、バッファタンク、気相流量計を通してノズルより放出される、計測箇所としてはノズル先端を 0mm として 200mm 毎に 5 箇所可視化撮影を行った。計測機器として高速度カメラ(Photron 製, FASTCAM Mini UX4k)を正面に置き、可視化部を挟み対向側に高輝度かつ均一な発光面を持ち、光量を調節可能な LED (日進電子製, LTD-530300)を設置した。レーザー光源には波長 532nm の YAG レーザー (株式会社日本レーザー製 DPGL-5W-L) を使用し、波長 550nm 以下の光を遮断させ、また乱反射光を遮断し、トレーサー粒子からの光のみを透過させる、すなわち粒子のみの撮影画像を得るためにカラーフィルター (株式会社ケンコー製 YA3) および偏光フィルターを使用した。用いたトレーサー粒子は 1.2.2.5 に記載する。

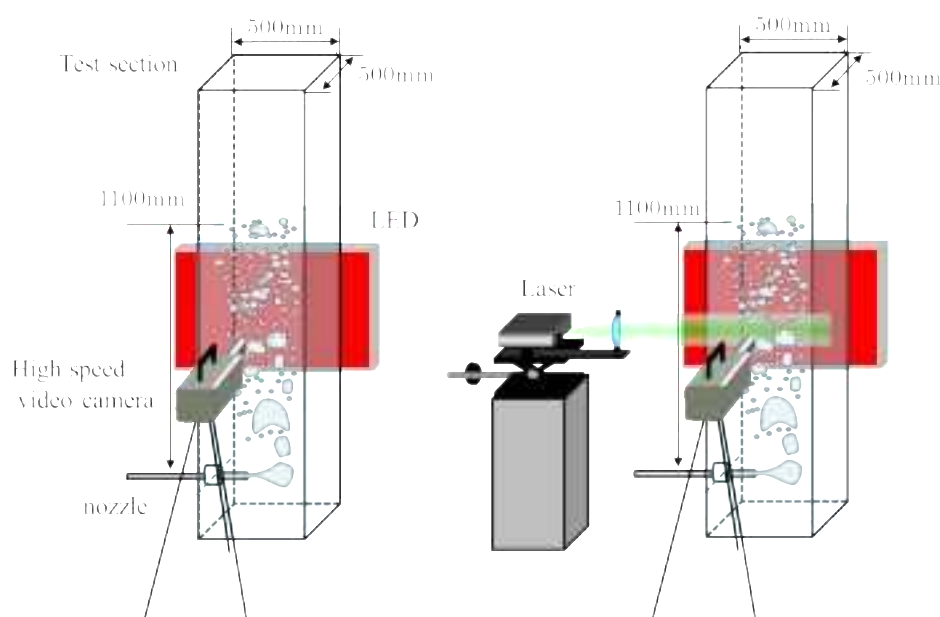


図 3-67 流動可視化手法_概念図

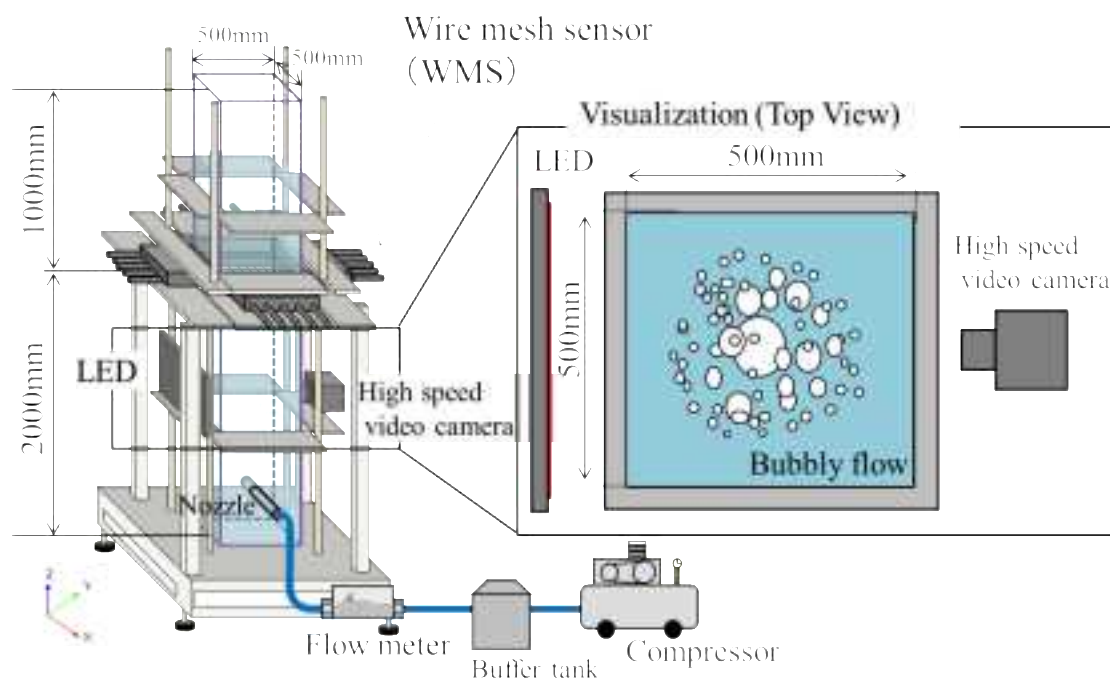


図 3-68 製作した試験部における可視化箇所

1.2.2.5 エアロゾル模擬粒子（トレーサ粒子）の選定

PIV技術によって速度場を算出するにあたり，流動場に追従するような微小な粒子を入れなければならない．また本研究では，気相噴流中の微粒子を追従するため，条件としてレーザ一等の光源により発光することや，比重が空気より軽く気泡内で浮遊することを条件に，トレーサ粒子の選定を行った．検討したトレーサ粒子を表 3.2 に示す．今後も，粒子径や不溶，可溶などをパラメータとして粒子の種類を検討していく必要がある．

表 3.2 用いたトレーサ粒子の種類

名称	粒子径	可溶, 不溶	注釈
疎水性シリカ粒子	0.03~0.11 μm	不溶（疎水）	
親水性シリカ粒子 AEROSIL OX 50	約 40nm	不溶（親水）	日本アエロジル
硫酸バリウム(BaSO_4)	0.64~5 μm	不溶（親水）	堺化学工業
エクспанセル粒子	10~17 μm	不溶（疎水）	日本フェライト
FLUOSTAR	15, 100 μm	不溶（親水）	蛍光粒子, EBM

		水)	
ローダミン 6B	3.22μm	可溶	蛍光染料
ヨウ化セシウム	—	可溶	和光純薬工業

1.2.2.6 PIV を用いた粒子挙動の可視化手法

粒子画像追跡法(PIV)は流れの速度分布を調べる方法として最も進化した計測法の 1 つであり、気相や液相などの流体の流れを直接的に把握する有力な流れ解析のツールである。

PIV 技術の長所として、1～6.が挙げられる。

1. LDV (Laser Doppler Velocimetry)、熱線流速計などの点計測による速度計測ではなく断面全体の二次元、三次元など多点・多成分の速度場計測を行うことが出来る。
2. 非接触計測のため流動場の流動を乱さない。
3. 流れの様子を視覚的に理解可能。
4. 低速領域から超音速などの高速領域までと適応速度範囲が広い。
5. 速度場ベクトルから流れの渦度、歪などの乱流諸量を算出することが出来る。
6. ラグランジュ的な計測が可能であるので、粒子や気泡の速度履歴を把握できる。

一方、短所としては、以下のことが挙げられる。

1. 流動場に追従するような微小粒子（トレーサー粒子）を微量に混入する必要がある。
2. 光学的アクセスが必須である。
3. 照明源が必要。
4. 速度のダイナミックレンジが狭い

二次元 PIV の仕組みとして、PIV 解析するための画像の取得は流動体に混入されたトレーサー粒子にシート及びパルスレーザーを照射し、その粒子の散乱光を高速度カメラを用いて撮影する。PIV 計測の概念図を図 3-69 に示す。その後、撮影した画像データをコンピュータに取り込むという手段が多く用いられている。

速度ベクトルの算出の方法としては、図 3-70 に示すとおり、1 枚目($t = t_0$)と微小時間後の 2 枚目($t = t_0 + dt$)の画像とを比較し、1 枚目で示されている微小矩形領域が 2 枚目ではどこに移動しているかを自己相関法や相互相関法などの手法を用いて特定する。そして、微小矩形領域の移動量を刻み時間 dt で除算することによって速度ベクトルを算出し、流動体の二次元断面における流動場を解析することが出来る。図 2.44 より、 x 方向速度 v_x と y 方向速度 v_y はそれぞれ以下のように表すことが出来る。

$$v_x = \frac{dx}{dt}, \quad v_y = \frac{dy}{dt} \quad (3.1)$$

そして、流速 v の大きさは、

$$v^2 = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (3.2)$$

となる。

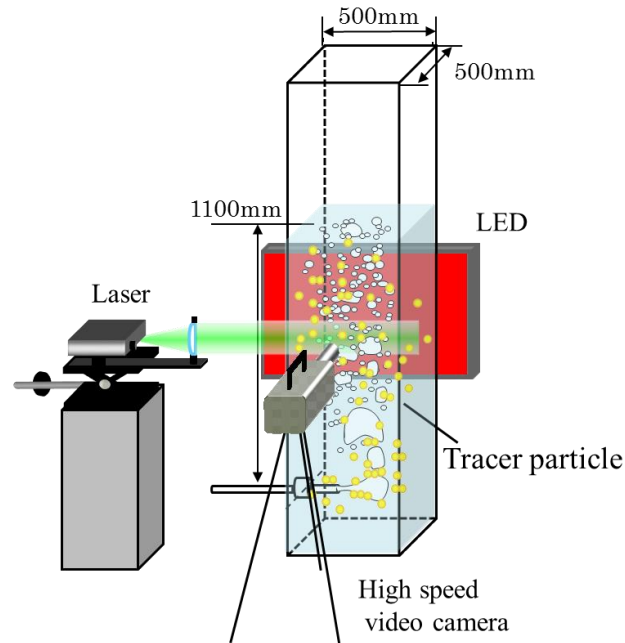


図 3-69 PIV 計測__概念図

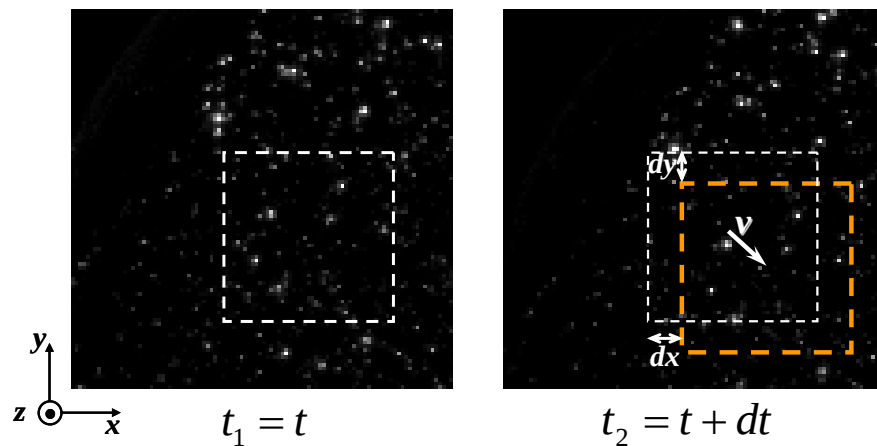


図 3-70 二次元 PIV の原理

1.2.2.7 ボイド率計測

二相流動計測手法として、コンダクタンス法、触針法、超音波、レーザー（光）、X線やガンマ線などの放射線を用いた計測方法が存在するが、装置規模およびコスト面、計測範囲など様々な制限が存在する。ワイヤメッシュセンサ（以下 WMS: Wire Mesh Sensor）は管路内にワイヤを設置する必要があるというデメリットを除けば、高温高压条件下で計測可能であり、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電気伝導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。原理の詳細については後述する。さらに WMS は送信側の電極層に対して受信

側の電極側の電極層を送信側電極層の上下に設置させることで気泡の通過時間差から気泡界面の移動速度分布も計測可能である。昨年度設備した WMS を構成する主要部分品のセンサ部およびコントローラー部の仕様を以下に示す。

センサ部仕様

1. 64 チャンネルダブルワイヤメッシュセンサ、流路寸法は 500×500 mm であること。
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 以下の計測が可能なこと。
10. 計測においては、導電率 0.5～1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、粘性係数 1 mPa・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。

WMS の写真を図 3-71 に示す。

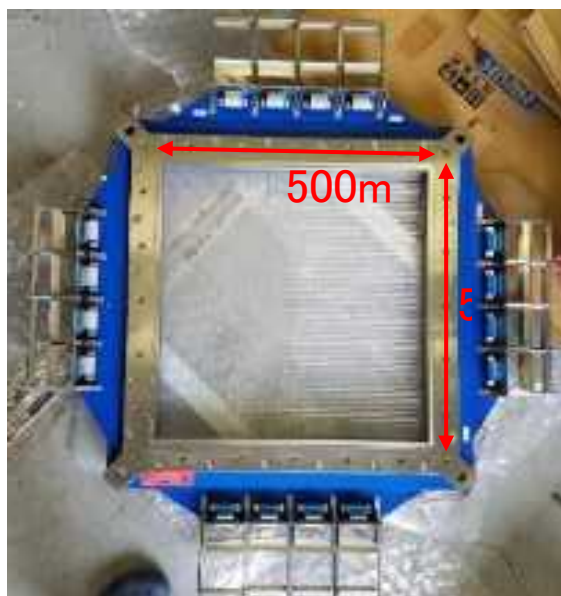


図 3-71 製作したワイヤメッシュセンサ

本実験装置に組み込んだ際の実験体系を図 3-72 に示す．前述したが，気相噴流の高さ毎にボイド率計測の実験手法として，図 3-73 のようにサブマージェンスを変更せず一定に保ち，ノズルの位置と水位を変更することで，相対的にボイド率の計測位置を変更する．計測位置は 100mm から 200mm 毎に 5 か所計測した．

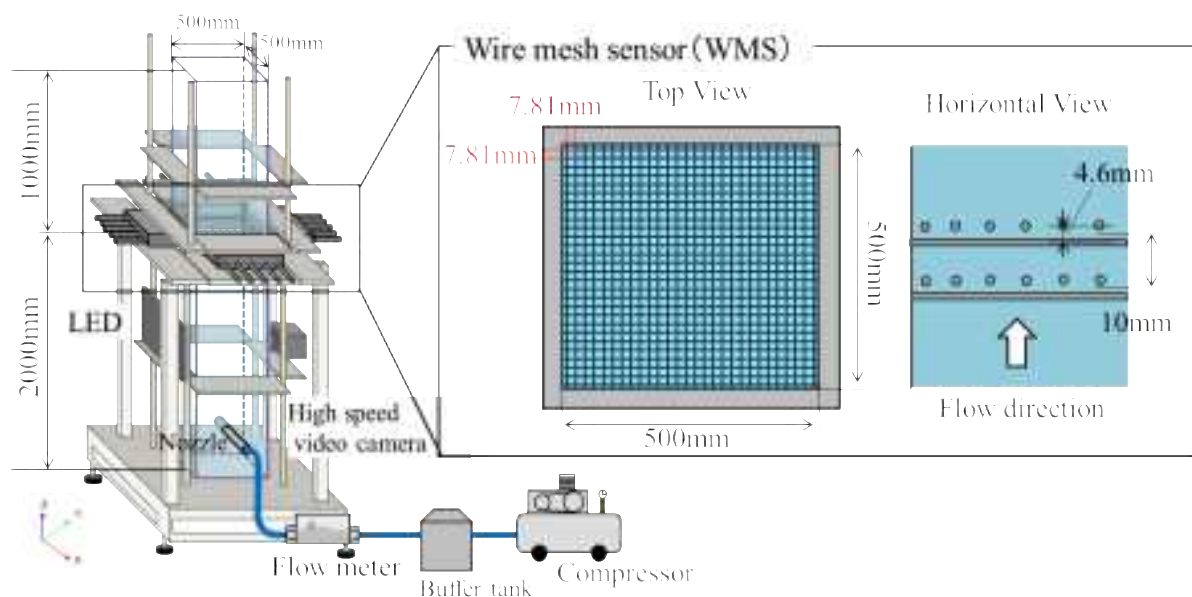


図 3-72 製作した試験部におけるボイド率計測箇所

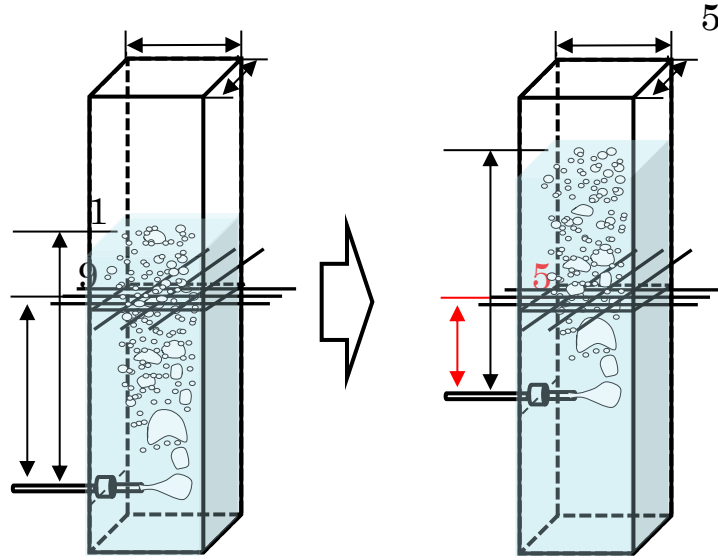


図 3-73 WMS によるボイド率計測位置の変更方法

ワイヤメッシュセンサの計測原理について以下に記載する。WMS は平行に張り巡らされたワイヤ層を二層直行させるような構造を持ち、ワイヤの交差部分は微小な間隔が存在する近接点となり、電極を構成することにより、一つ一つの近接点が二相流流動計測点になる。図 3-74 に WMS 計測制御信号処理系統の概略図を示す。WMS では、スイッチ S_p とスイッチ ($S_1 \sim S_3$) で生成したバイポーラパルス信号を生成する。このバイポーラパルス信号を電極間（トランスミッタ・レシーバ間）に印加し、レシーバに流れる電流を計測することで流路断面のボイド率分布データに変換する

水単相での導電率を計測することで気液二相流でのボイド率計測結果の校正を行うことができる。局所ボイド率の校正式を以下に示す。

$$\varepsilon = \frac{U_W - U_{meas}}{U_W} = 1 - \frac{U_{meas}}{U_W} \quad (3.3)$$

校正值 U_w は水単相計測したデータに気相がないことをチェックした後、平均化した値を使用する。校正データは圧力や温度、導電率が変化するような実験条件ごとに計測する必要があるため、実験条件は統一してあるが、実験を行う前の試験部の水を入れた直後と実験終了後の水を抜く直前において水単相での校正值を取得した。図 3-75 に WMS ボイド率計算図を示す。気相の速度計測は 2 つの測定面を使用することにより、時間および方位平均的なガス速度を求めるがその際、以下に示す相関係数を用いて求められる。相関係数はある計測時刻において 2 つの時系列データがどの程度類似（相互依存）しているかを示す統計学的指標である。

$$F_{i,j,\Delta k} = \frac{\sum_k \varepsilon'_{1,i,j,k} \cdot \varepsilon'_{2,i,j,k+\Delta k}}{\sqrt{\sum_k \varepsilon'^2_{1,i,j,k}} \cdot \sqrt{\sum_k \varepsilon'^2_{2,i,j,k}}} \quad (3.4)$$

上流側 WMS の局所ボイド率 $\varepsilon'_{1,i,j,k}$ 下流側 WMS の局所ボイド率 $\varepsilon'_{2,i,j,k}$ としており、 Δk

は時間変化（遅延時間）を示している。

$$\varepsilon'_{i,j,k} = \varepsilon_{i,j,k} - \bar{\varepsilon}_{i,j,k} \quad (3.5)$$

変動成分 $\varepsilon'_{i,j,k}$ は、上式に示される通り瞬時値から時間平均を差し引くことによって計算される。相互相関は高速フーリエ変換によって実施している。このようにして得られたボイド率の時系列データに相互相関解析を実施し相互相関係数が最大値になったとき最大値から最小値までの時間が上流側 WMS と下流側 WMS の距離を通過する際の最も適切な時間であるとして計算している。図 3-76 に金井らが行った相互相関関数の解析例を示す。図 3-76 においては時間差 29ms の位置に相互相関係数の最大値が見られ上下流の WMS で計測した時系列データは 29ms の時間差が存在することになる。この時間差と WMS 二層間の距離を用いて速度を算出する。

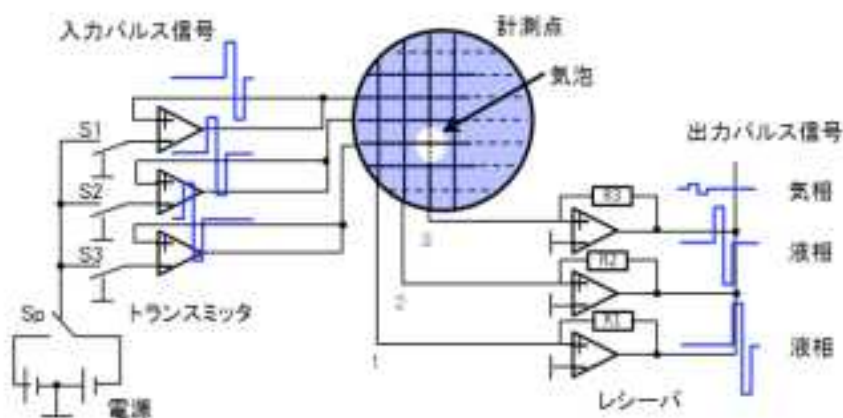


図 3-74 WMS の電気系統図

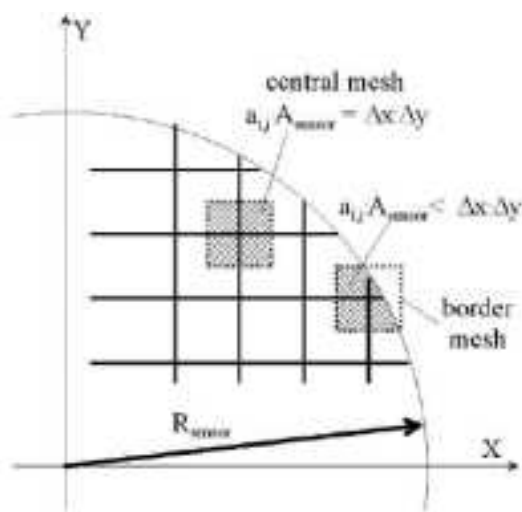


図 3-75 ボイド率計算図

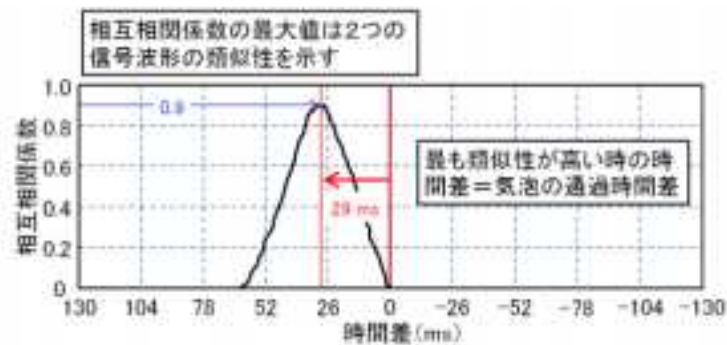


図 3-76 上流側 WMS および下流側 WMS の相互相関例

1.2.2.8 エアロゾル計測の検討

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。

$$DF = \frac{N_{li}}{N_{oi}} \quad (3.6)$$

N_{li} 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 3-77 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。

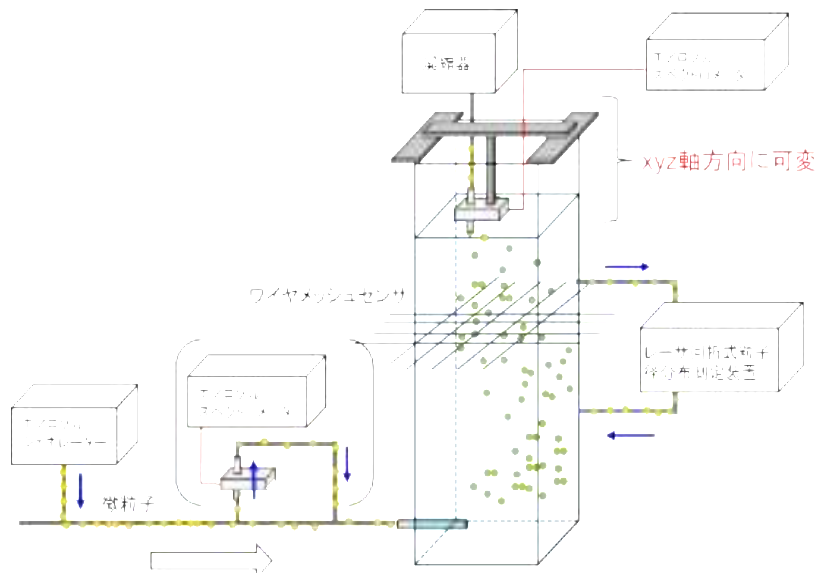


図 3-77 エアロゾル計測の実験体系

エアロゾル計測器の検討としては、関連研究で用いられていたことと、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)を用いることとした。表にエア

ロゾルスペクトメーターの仕様を示す。表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ーケーブルで接続されるため、本実験の試験部が3000mm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、光ファイバーを介し、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、光ファイバー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 3-78に示す。

表 3.3 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	キセノンランプの出力により 最大10 ⁶ 個/cm ³ 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: -150°C to +250°C)
コントローラー寸法・重量	430 × 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 3-78 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 3-79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

$$\dot{N}_{\text{particle}} = (Q_G + Q_{\text{particle}})N_{\text{particle}} \quad (3.7)$$

$$Q_{\text{particle}} = \dot{N}_{\text{particle}} + \frac{\pi}{6} d_{\text{particle}}^3 \quad (3.8)$$

A_{piston} ピストン断面積 d_{particle} はエアロゾル粒径， DF は除染係数， N_{particle} は個数濃度， $\dot{N}_{\text{particle}}$ は個数， Q_G 気相体積流量 v_{piston} ピストン速度 η 充填効率としてエアロゾルの発生量は次式で決まる

$$Q_{\text{particle}} = \eta Q_{\text{piston}} \quad (3.9)$$

$$Q_{\text{piston}} = A_{\text{piston}} v_{\text{piston}} \quad (3.10)$$

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

$$N_{\text{particle}} = \frac{\dot{N}_{\text{particle}}}{Q_{G1} + Q_{\text{particle}}} = \frac{1}{\frac{\pi}{6} d_{\text{particle}}^3 \left(\frac{Q_G}{\eta A_{\text{piston}} v_{\text{piston}}} + 1 \right)} [\text{p/cc}] \quad (3.11)$$

$$N_{\text{particle}} = \frac{\dot{N}_{\text{particle}}}{Q_{G1} + Q_{\text{particle}}} = \frac{1}{\frac{\pi}{6} d_{\text{particle}}^3 \left(\frac{DF}{\eta A_{\text{piston}} v_{\text{piston}}} \frac{Q_{G6} + Q_{G7}}{Q_{G6}} (Q_{G1} + Q_{G2}) + 1 \right)} [\text{p/cc}] \quad (3.12)$$

エアロゾル粒径 $d_p=0.45 \text{ mm}$ の場合（例：硫酸バリウム）であれば $4.2 \times 10^3 \sim \leq N_{\text{particle}} \leq 3.5 \times 10^9 \text{ p/cc}$ ，エアロゾル粒径 $d_p=10 \text{ mm}$ の場合（例：エクспанセル粒子） $3.8 \times 10^{-1} \sim \leq N_{\text{particle}} \leq 3.2 \times 10^5 \text{ p/cc}$ 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 3-80に示すような濃度範囲のセンサを使用することとした．

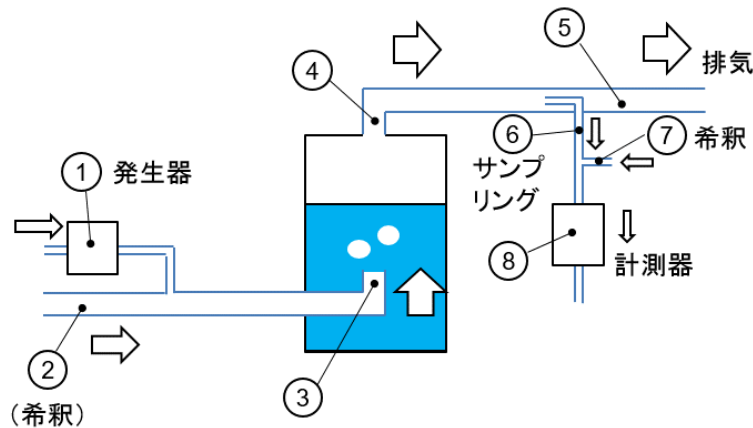


図 3-79 濃度を概算するための計算体系

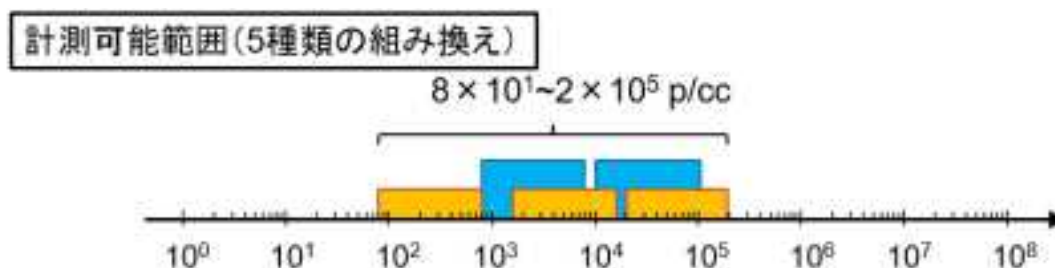


図 3-80 エアロゾル濃度範囲

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 3.4 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 (100mm/h)
RBG 1000	70	7	3.1	36 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
		28	49.2	616 mg/h	3080 mg/h	433 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

1.2.2.9 液相温度および圧力計測

試験容器内に熱電対を設置し液相温度を計測する。またサーモグラフィを用いて液相の温度分布を取得する。液相内で温度成層化を形成させた際には、高さ方向の液温温度分布を取得する必要があるため図 3-81 に示すように、高さ方向 200mm ごとに熱電対用のポートを設けている。ポートに熱電対を挿入することで試験部容器内の高さ方向の大まかな液温分布を測定する。製作した試験部容器においては 200mm ごとに 14 か所、熱電対を設置可能な仕様とした。

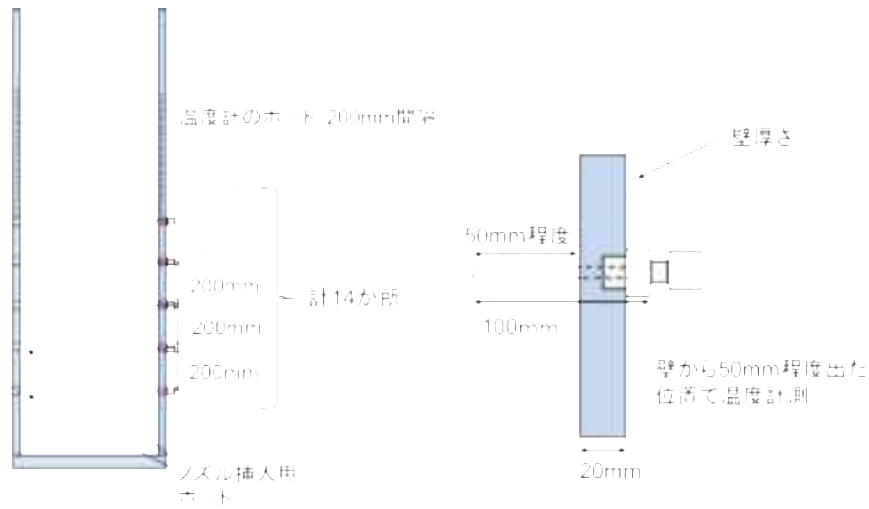


図 3-81 熱電対設置箇所

また、ボイド率計測機器であるワイヤメッシュセンサの計測データ妥当性確認のため、試験部容器内の液相圧力差を計測することでボイド率を計算する。以下に計算式を記載する。計算の概念図を図 3-82に示す。h₁での水の質量をm₁、断面積をAとすると、h₁での水頭圧P₁は以下で表される

$$P_1 = \frac{m_1 g}{A} \quad (3.13)$$

h₂での水の質量をm₂、断面積をAとすると、h₂での水頭圧P₂は

$$P_2 = \frac{m_2 g}{A} \quad (3.14)$$

よって二点間の差圧ΔPは以下の式で表される。

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{(m_1 - m_2)g}{A} \quad (3.15)$$

そして上式より求めた差圧を使用して以下の式より空間ボイド率αを計算する。

$$\alpha = 1 - \frac{\Delta P}{\rho_l g h} [-] \quad (3.16)$$

確認として上式の次元は $\alpha = 1 - \frac{kg \cdot m/s^2/m^2}{kg/m^3 \cdot m/s^2 \cdot m}$ となり無次元となる。このようにして空気が存在する分だけ水の重量が小さくなることを利用し空間ボイド率を計算する。

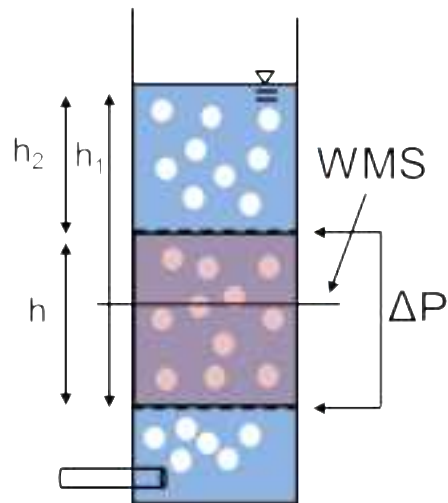


図 3-82 差圧によるボイド率計算の概念図

1.2.2.10 試験条件

試験条件は大気圧で行い，試験部容器内の液温及び気泡内の蒸気の温度範囲は常温～100℃とする．作動流体は，水－空気（窒素），難溶解性エアロゾルで行う．試験パラメータは，ガス噴出し方向を上方向とし穴形状を円とする．内径 3,6,10mm のステンレスノズルを用いて行う．ガス流出速度は，単気泡相当の流速条件～十分に大きな速度範囲で非凝縮性ガス濃度：0～100%まで調整可能である．エアロゾルの組成・粒径・濃度も計測方法を検討し計測を行う．サブクール度は液温が常温から飽和温度までの範囲とする（高さ方向に大きな温度勾配を設定する実験条件も含む）．サブマージェンスは 100mm 弱～2000mm 強まで試験部容器内で調整可能である．

1.2.3 気相噴流の流動構造の評価

本研究の妥当性確認の対象としている解析コードは流動モデルを用いた除染モデルにおいて除染係数を計算する。そのために除染モデルの前提条件として使用されている流動モデルから妥当性の検証を行う必要がある。本章ではプールスクラビングにおける気相噴流の流動構造を詳細に把握するため、ボイド率計測および可視化計測を行い評価を行った結果について述べる。

1.2.4 気相存在頻度による噴流幅の計測

まず初めに気相噴流の全体像を取得し、高さ方向に流動様式を同定することができるか検討した。光源としてはメタルハライドランプ（Photron 製，HVC-SL）を4つ高さ方向に並べることで噴流全体範囲を照射させた。なおメタルハライドランプから照射される光は指向性が強いので、トレーシングペーパーによって拡散させることで局所的に輝度の高い撮影箇所が発生しないように注意した。図 3-83 に流量ごとの気相噴流全体像の可視化結果を示す。比較的低流速の条件においては、噴流の中心部に大きな気泡が存在し、その周囲に比較的小さな気泡が多数存在していることが確認できる。高流速条件に関してはジェット形状を形成し、中心部の密度が高いことが分かるが、詳細な内部構造の把握は困難なことがわかる。噴流表面外側においては低流速条件と同様に小さな気泡が多数存在することが確認された。図に示す可視化結果に背景差分を行い、画像を平均化することで噴流形状を取得した。画像処理結果を図 3-84 に示す。平均した時間は2秒間とした。図 3-84 より、可視化結果と同様に、噴流の中心部では気相が多く存在することが確認された。噴流幅は今回の実験体系および、処理方法では高さ方向に線形的に広がる傾向を示し、既存研究¹⁾で示されているような領域の確認はできなかった。また噴流幅は流量の増加に伴い大きくなることが確認され、図 3-85 より、ノズル径にはあまり依存しないことが確認された。また妥当性確認の対象である MELCOR 解析モデル内で使用されている流動モデルの概念図と流動様式の異なる挙動を示していることが分かる。これは解析モデルにおいては、今回行った実験条件の水-空気の断熱条件ではなく、蒸気および非凝縮性ガスを混入させ、凝縮等を考慮したモデルであることが考えられる。また現状の実験体系としては、試験部寸法の関係上、噴流の下降流が発生している。これは解析モデルにおいて、壁の影響を考慮していない半径方向に無限遠としている流動モデルとは多少異なる体系となっている。今後、下降流の気泡の評価し除外する方法を構築すべきかについても検討する必要がある。また、今後の計測項目として大気泡の発生周期や頻度、上昇速度等を評価すべきであると考えられる。

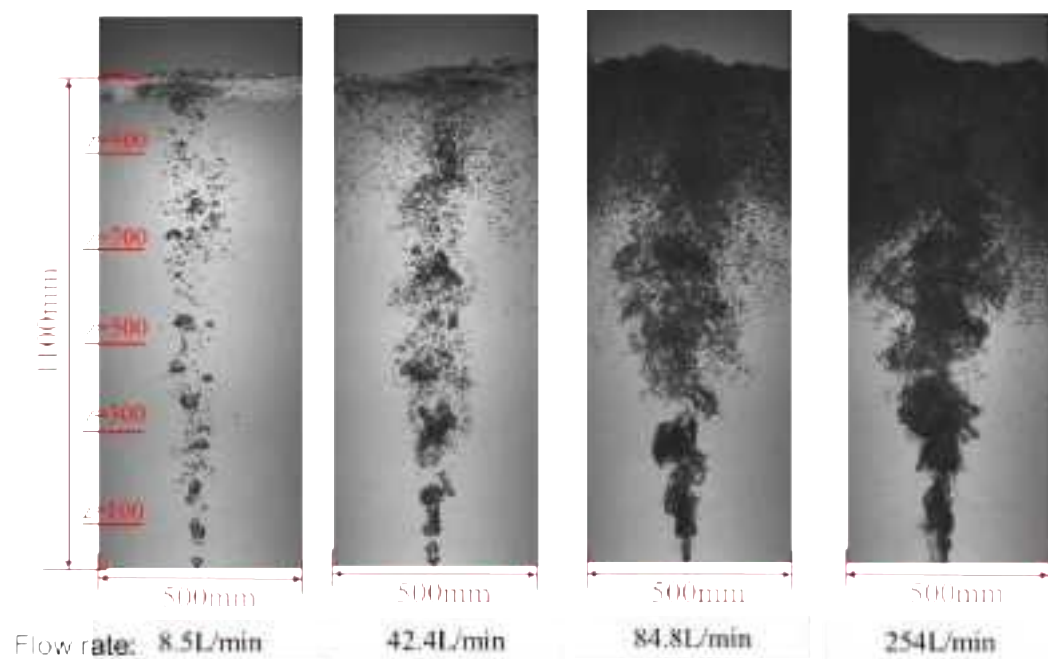


図 3-83 気相噴流全体像の可視化結果

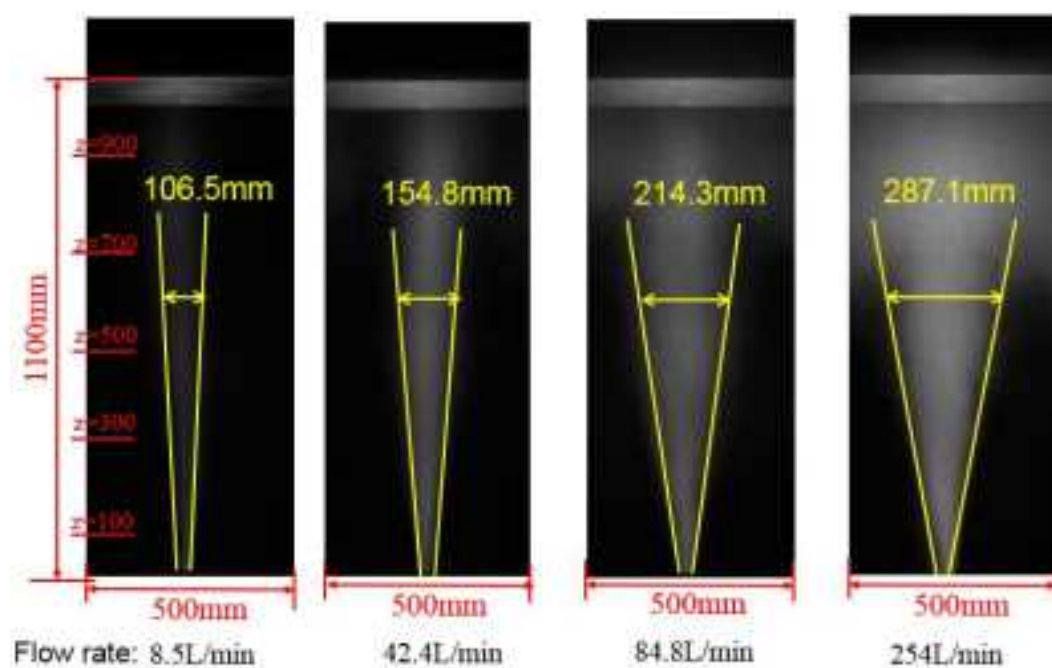


図 3-84 気相存在頻度による噴流幅の計測_流量依存性

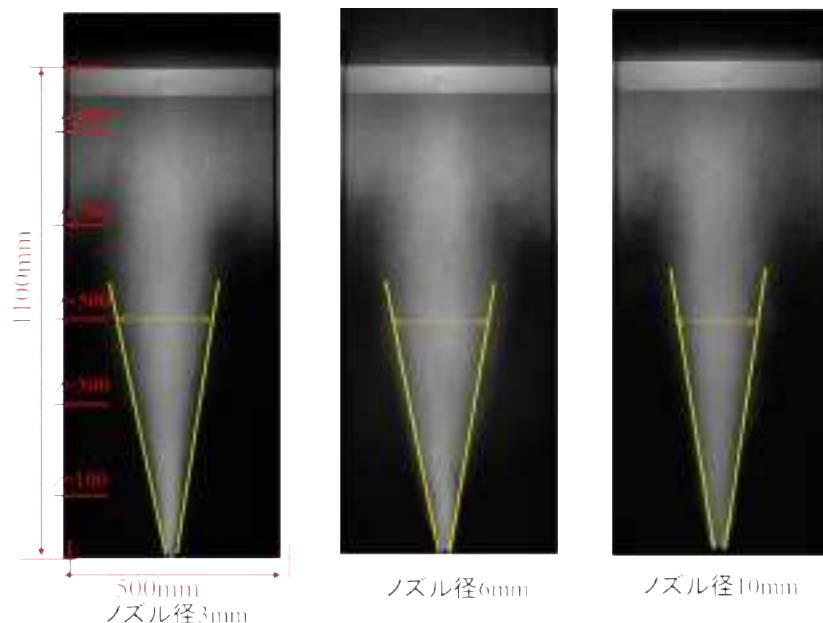


図 3-85 気相存在頻度による噴流幅の計測_ノズル径依存性

1.2.5 ボイド率分布の評価

WMS を用いて気相噴流の高さ毎のボイド率分布計測を行った．図 3-86 に断面ボイド率分布計測結果と断面ボイド率分布内に赤線で示す部分の時空間分布結果を一例として図に示す．計測箇所はノズル先端から 700mm とした．また WMS 直前の流動を高速度カメラを用いて可視化撮影した．その可視化結果例を図 3-87 に示す．図からボイド率分布の計測範囲と可視化結果の寸法がおおよそに合っていることが確認できる．実験条件は気相流量 254L/min, ノズル内径 6mm である．今回の実験において，ノイズの影響を除くため，WMS と高速度カメラは外部トリガーで電氣的な同期は行わず，手動でほぼ同時刻の流動を可視化撮影した．

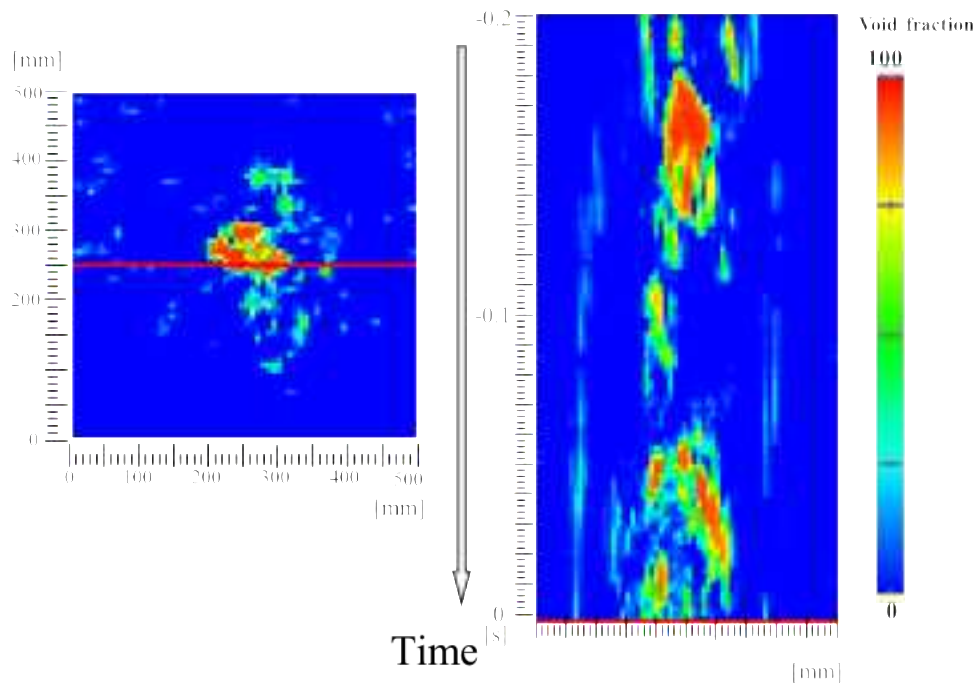


図 3-86 WMS によるボイド率分布計測例 ($z=700\text{mm}$)

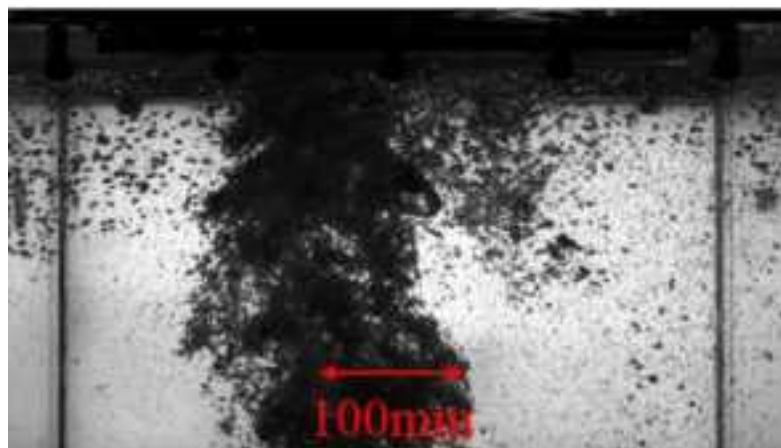


図 3-87 手動で同時計測した可視化結果例 ($z=700\text{mm}$)

例として示した計測を高さ(z 方向)にノズル先端を 0mm として $z=100, 300, 500, 700, 900\text{mm}$ 地点にてそれぞれ実施した. 図 3-89 に各高さ位置での時空間結果を示す. 結果より計測点が高くなるにつれてボイド率の分布が広がっていく傾向が確認できる. ノズルから比較的近い計測点 ($z=100, 300\text{mm}$) においては気相が連なった流動が確認でき, 気相噴流がある程度上昇した計測点 ($z=500, 700, 900$) においては $48.8\text{mm} \sim 87.1\text{mm}$ 程度の大気泡と思われる気相範囲が確認できた. 気相範囲計測はメッシュ間隔より概算した. また断面ボイド率分布を時間平均することで断面平均ボイド率分布を取得した結果を図 3-90 に示す. 図 3-90 より図 3-89 の時空間分布結果で示されたようにノズル近傍 ($z=100\text{mm}$) において中心部のみ高いボ

イド率であるが、気相噴流の計測位置が高くなるにつれて半径方向に広がりを確認できた。また半径方向の広がりに伴い中心のボイド率が減少していくことが確認された。これはノズル近傍では気相が一つにまとまった状態で存在しているが、上昇していく過程で気相が分裂していき、ボイド率が分散したためであると考えられる。時間平均は3秒間としており、また計測は図 3-88 に示すようにボイド率が安定している、すなわち気相噴流が安定して流路中心に存在するような状態になってから実施した。

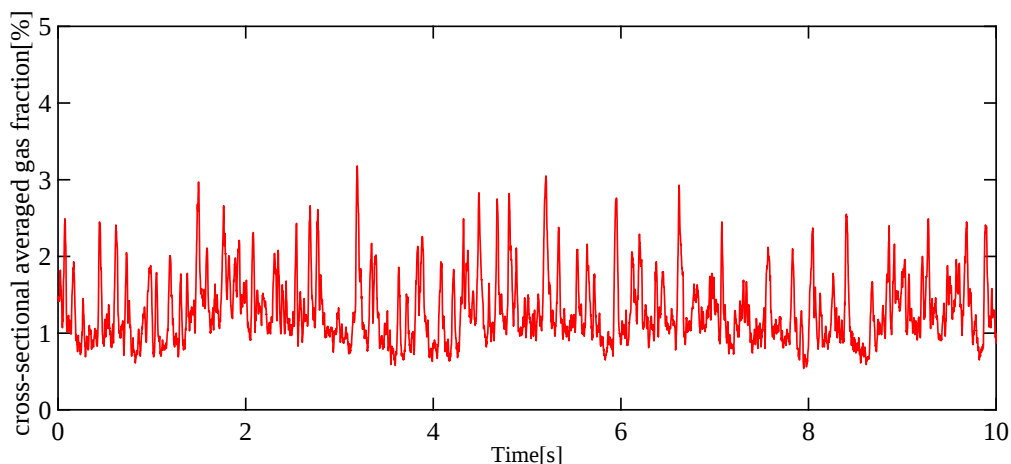


図 3-88 計測時の流路断面の平均ボイド率の時系列結果

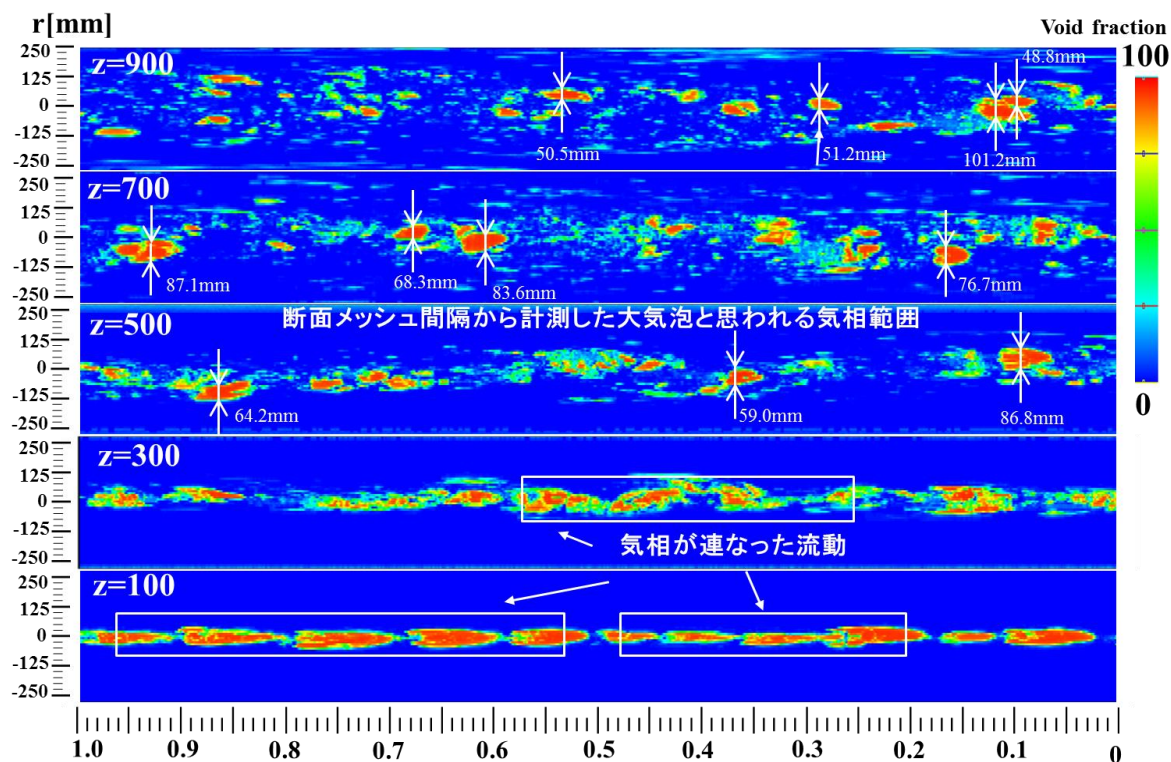


図 3-89 各高さ位置でのボイド率分布の時空間図

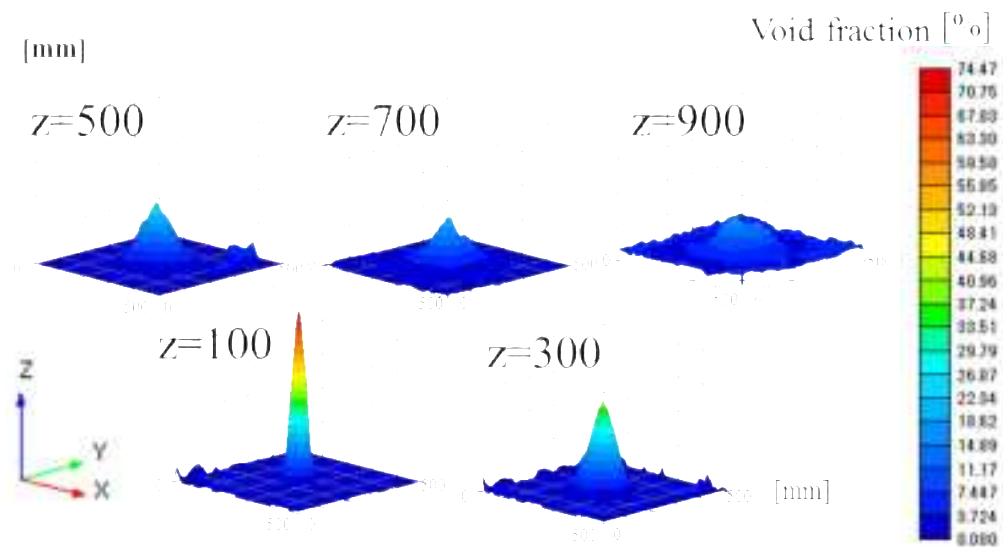


図 3-90 各高さ位置での断面平均ボイド率分布

1.2.5.11 気相流量およびノズル径によるボイド率変化

図 3-91に気相流量を変化させた気相噴流の平均ボイド率分布結果を示す．図 3-91において緑，青，赤の順にそれぞれ8.5L/min, 84.8L/min, 254L/min, ノズル内径は6mm一定としている．結果より全ての流量条件においてノズル出口付近では中心のみ高ボイド率であるが，計測位置の上昇に伴い，中心のボイド率が半径方向に広がる傾向が確認できる．また気相流量の増加に伴い噴流中心のボイド率が増加することが確認できる．大流量（高流速）条件においては80%程度のボイド率となっていることが分かる．また中流量および大流量条件下においては水槽壁面近傍においてボイド率が高くなっていることが分かる．これは本実験体系上存在する気相噴流の下降流による気泡の停滞が原因と考えられる．この気泡の停滞に関して噴流の上昇気泡群と分別して評価する必要があると考えるが今後の課題とする．次に気相流量を84.8L/min一定とし，ノズル径を変更した際の気相噴流の平均ボイド率分布結果を図 3-92に示す．図 3-92において緑，青，赤の順にそれぞれ3mm, 6mm, 10mmとなっている．結果より噴流の高さ方向に広がっていく挙動は気相流量を変化させた場合と同様に確認できる．ノズル近傍（ $z=100\text{mm}$ ）を除いて全条件においてボイド率分布はおおよそ同様の形状を示しており，噴流中心軸上のピーク値にも変化は見られないが，計測点 $z=100\text{mm}$ においてはノズル内径が小さいほど気相噴流の中心軸上のピーク値が若干高くなる傾向が確認された．これは放出される気相体積は一定であるため，気泡が安定して上昇する領域（ $z=300\sim 900\text{mm}$ ）においてはボイド率分布も同様のピーク値を示すが，ノズル近傍においては気相流量が一定であってもノズル径の違いによる見かけ流速の違いが影響していると考えられる．また流動様式について検討するため，図 3-91図 3-92の各条件においてそれぞれ噴流の中心軸上のピーク値のみプロットした結果を図 3-93図 3-94に示す． $z=300\text{mm}$ を堺にボイド率の減少が緩やかになることが確認され，これを既存研究[]で示した領域に当てはめると運動量支配領域と遷移領域および浮力領域の合わさった領域とするのが妥当であると考えられる．ボイド率の遷移点を10%と定義しているが，本実験体系においては $z=300\text{mm}$ 付近であり，ボイド率は気相流量の増加に伴い上昇することが分かった．

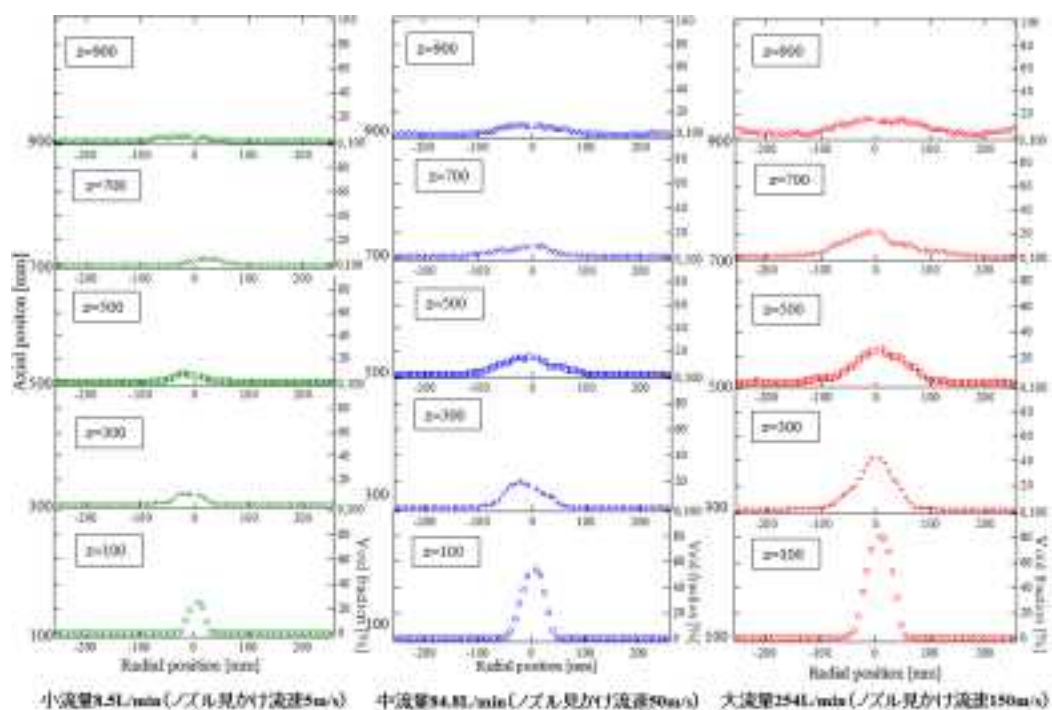


図 3-91 ボイド率分布_気相流量依存性

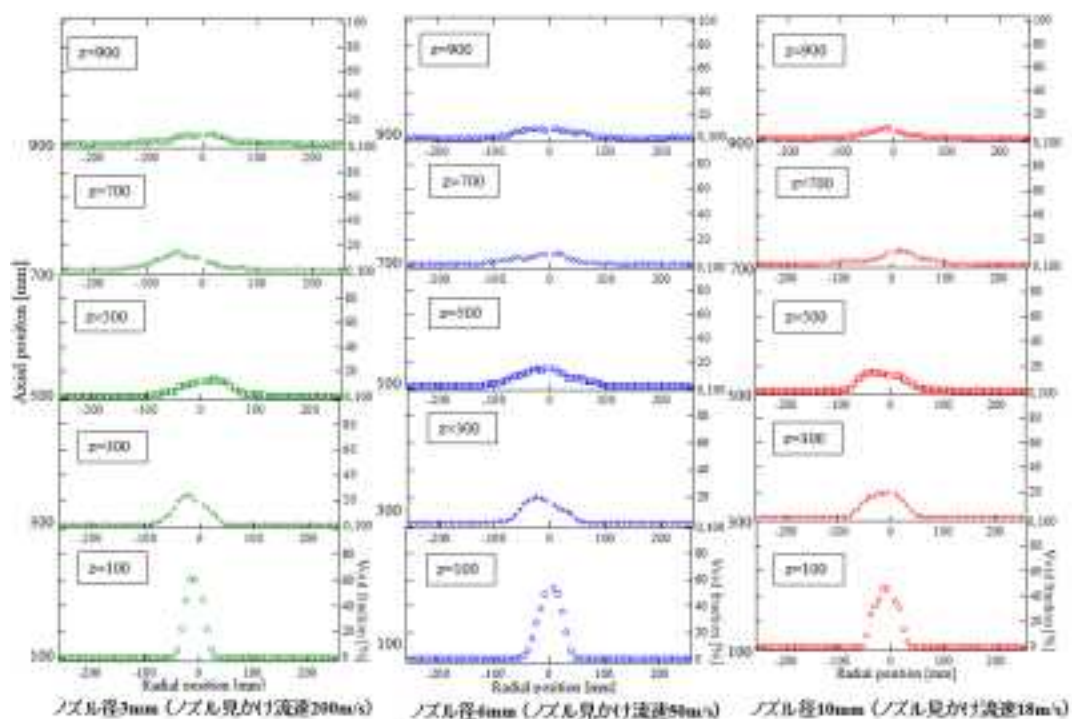


図 3-92 ボイド率分布_ノズル径依存性

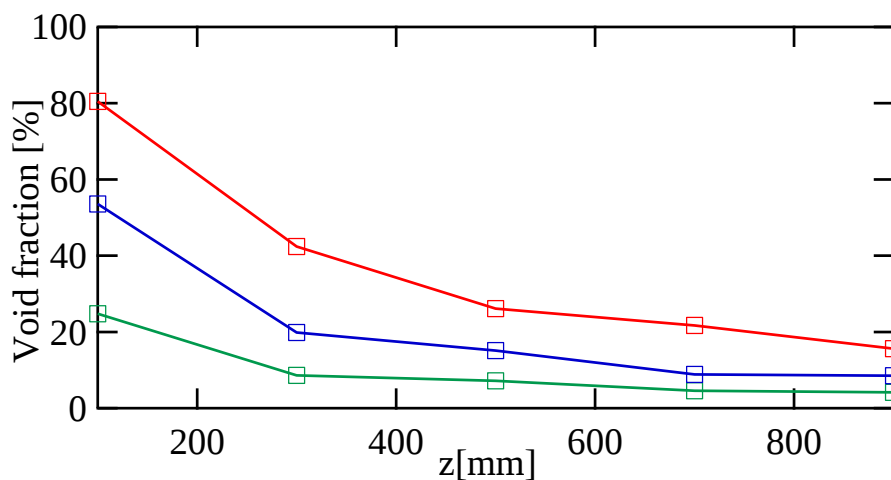


図 3-93 中心軸上ボイド率_気相流量依存性

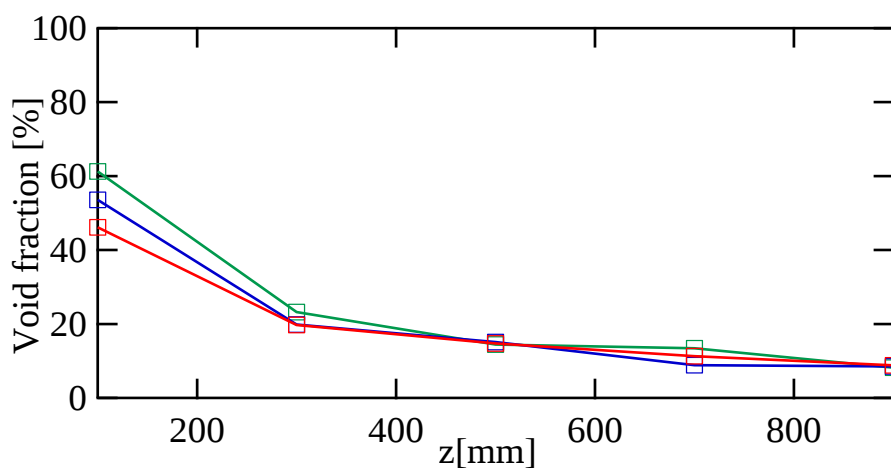


図 3-94 中心軸上ボイド率_ノズル径依存性

1.2.5.12 差圧計測による妥当性確認

に示すとおり，試験部側面のポート 230mm 離れた二点間において圧力計測を行い，液単相での水頭圧を計測，また空気を流した場合の水頭圧を計測し，その圧力差を用いて空間ボイド率を計算した．今回は差圧計測が高さ方向に線形的に増加することより，差圧結果が正しいと仮定して，WMS の最大計測値を用いた．その結果を図 3-95 に示す． $z = 700\text{mm}$ および 900mm においては誤差%以内で両者は一致することが確認された． $100\text{mm} \sim 500\text{mm}$ においては WMS の計測結果のほうが高く示すことが確認された．本来は WMS 計測結果の算術平均値を用いるべきであると考えていたが，算術平均値では整合性は取れず，最大値のほうが整合性が取れるという結果になった．理由については今後より長時間の計測を行い，算術平均値を用いて検討すべきと考える

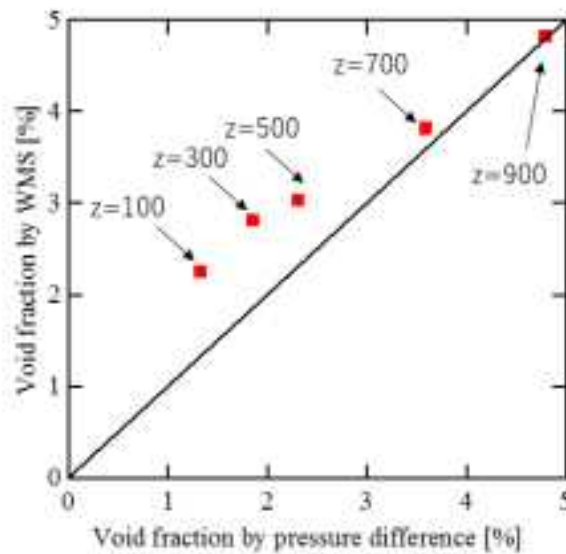


図 3-95 差圧計測とWMSによるボイド率の比較

1.2.6 気相界面速度分布の評価

WMS の計測時間差を用いて気相噴流の高さ毎の気相界面速度分布計測を行った．流路断面の平均気相界面速度分布を取得した結果を図に示す．結果よりノズル近傍 ($z=100\text{mm}$) においては高速で噴出していることが分かる．計測位置が高くなるにつれて噴流中心の上昇速度が低下し，周囲に分布が広がる傾向が確認できる．また計測位置がある程度高くなると速度の低下が緩やかになる傾向が確認できる．

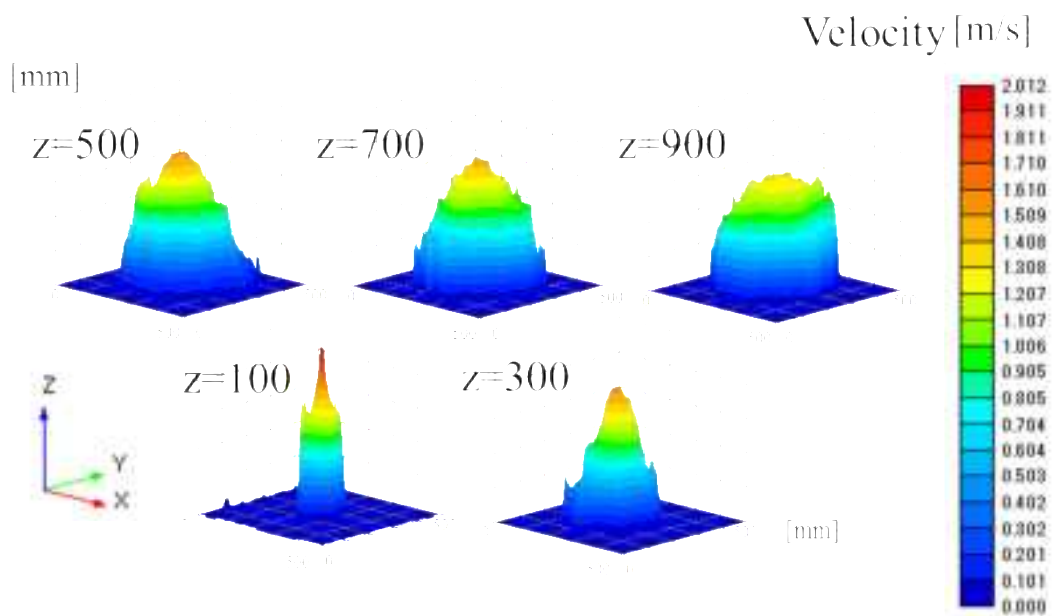


図 3-96 各高さ位置での気相界面速度分布

1.2.6.13 気相流量およびノズル径による速度変化

図 3-97 に気相流量を変化させた気相噴流の速度分布を示す．図 3-97 において緑，青，赤の順にそれぞれ 8.5L/min, 84.8L/min, 254L/min, ノズル内径は 6mm 一定となっている．結果より全ての流量条件においてノズル出口付近では中心のみ高速で上昇しているが，計測位置の上昇に伴い，中心の速度が減少し，また分布は半径方向に広がる傾向が確認できる．また気相流量の増加に伴い噴流中心の上昇速度が増加することが確認できる．次に気相流量を 84.8L/min 一定とし，ノズル径を変更した際の気相噴流の気相界面速度分布結果を図 3-98 に示す．図 3-98 において緑，青，赤の順にそれぞれ 3mm, 6mm, 10mm となっている．結果より，全条件において速度分布はおおよそ同様の形状を示しており，噴流中心軸上のピーク値にもあまり変化は見られないことが確認された．結果より気相速度に関してはノズル径には依存せず，気相流量のみに依存することが確認された．これは気相の慣性力による現象であると考ええる．また現状の計測結果は処理において上流側 WMS と下流側 WMS の計測時間差を用いているため， z 軸方向のみの一次元の速度で，気泡の下降流等は計測されていない．前述したがこれは解析モデルに使用されている流動モデルとは体系が異なる．今後，下降流や x , y 軸を含む三次元的な上昇速度を把握する必要があるかも含め検討する必要があると考える．

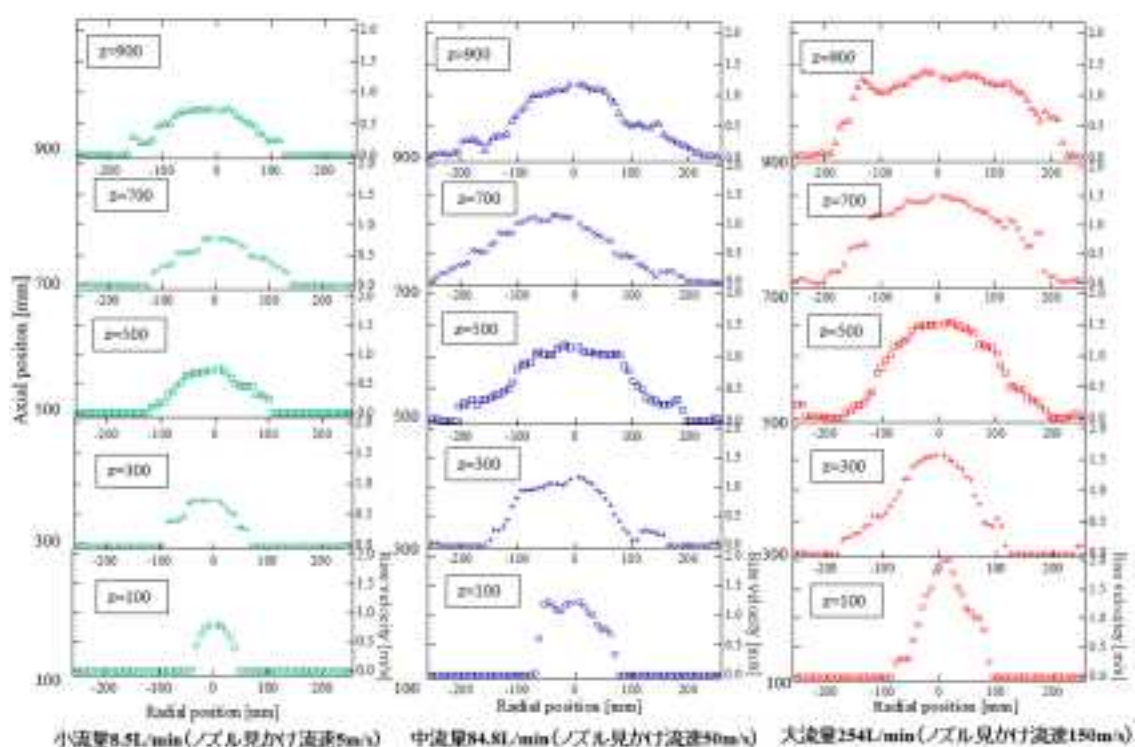


図 3-97 気相界面速度分布_気相流量依存性

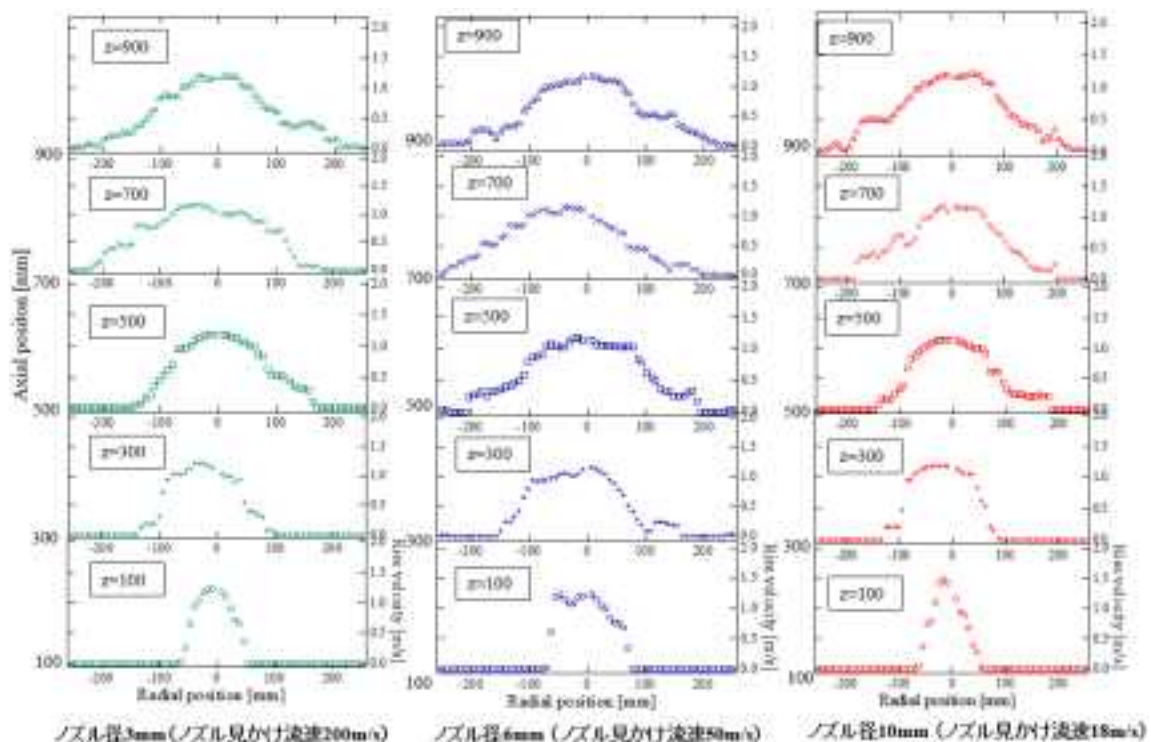


図 3-98 気相界面速度分布_ノズル径依存性

1.2.6.14 画像処理を用いた単一気泡による妥当性確認

WMS より計測し気相界面速度分布結果の整合性確認のため単一気泡を用いて可視化より計測した速度と WMS の二層の計測時間差から得られる速度を比較する．可視化より得られた速度の時系列結果を図 3-99 に示す．また二層の WMS のボイド率の時系列結果を図 3-100 に示す．また可視化より得られた気泡径は長軸:9.27mm 短軸:4.59mm であった．上流側 WMS と下流側 WMS の距離は 10mm である．図 3-99 の結果を平均値は 0.239m/s となり WMS から得られた速度は 0.2485m/s となり，誤差 3.9%という結果になった．また気泡：長軸:6.19mm 短軸:3.52mm の比較的小さな気泡においても同様に比較した．結果としては WMS より計測された気泡上昇速度は 0.2248m/s となり画像処理より計測された気泡の平均上昇速度は 0.257m/s となった．誤差は 12.5%となり，気泡径が小さくなると誤差が大きくなることが確認された．原因としては，画像処理による誤差と WMS の計測誤差両方存在するため，今後の検討項目とする．また気泡群での整合性確認については今後流量を増加させて同様の実験を行う必要があると考える．

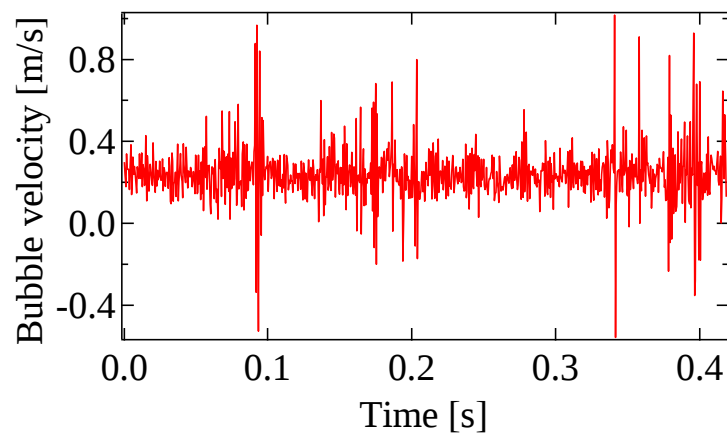


図 3-99 画像処理による気泡の速度の時系列結果

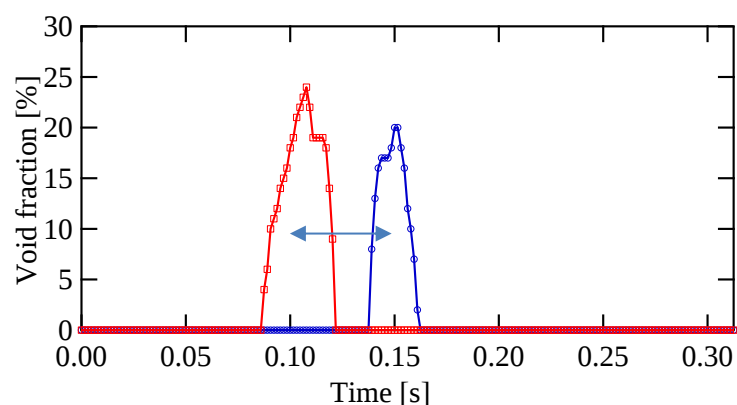


図 3-100 単一気泡計測時のボイド率の時系列結果

1.2.7 気相噴流中の気泡挙動の評価

1.2.7.15 水－空気系における気泡挙動

LED ライトと高速度カメラを用いたバックライト法により上昇気泡群を可視化観測し、取得した画像から気泡径および扁平率を上昇速度を評価した．実験条件としては水槽壁面の影響を受けず比較的気泡の重なりが少ない 8.5L/min および実機相当の 115L/min としてノズル内径 3mm ，サブマージェンス 1000mm としてノズル先端を 0mm として 200mm ごとに可視化撮影を行った． 8.5L/min の可視化結果を図 3-101 に示す． 115L/min の可視化結果を図 3-102 に示す．図 3-101 より結果としてノズル出口付近においては気相の噴出は間欠的であり，円錐形状の気泡が生成される様子が確認された．これは解析モデルに記載されている形状と同様のものであると考えられる．ノズルから生成された円錐形状の気泡に画像処理を行うことで気相の体積を計測した結果， 67801mm^3 であることが確認された．上昇過程においては上昇する気泡が分裂合体を繰り返しながら上昇していく挙動を観測した．またすべて

の計測位置において大気泡の存在が確認された。また図 3-102 よりノズル出口付近においてはジェット形状の気相が確認でき、その周りに小気泡が生成されていることが確認できる。低流速気相噴流と同様にすべての計測位置において大気泡の存在が確認された。また水面の可視化結果からは気泡が破裂しその際にエントレインメント液滴が生成、飛散する挙動が確認された。高速気相噴流では低流速条件に比べて飛散する液滴の数および速度が増加する傾向が示唆された。現状の可視化手法では液滴径および流速の計測が行えていないため、今後エアロゾル計測器や短パルス光源など用いて計測することができるかも含め検討する必要があると考える。低流速条件においては可視化をメインに計測を実施し、高流速条件においては WMS をメインに計測を実施した。

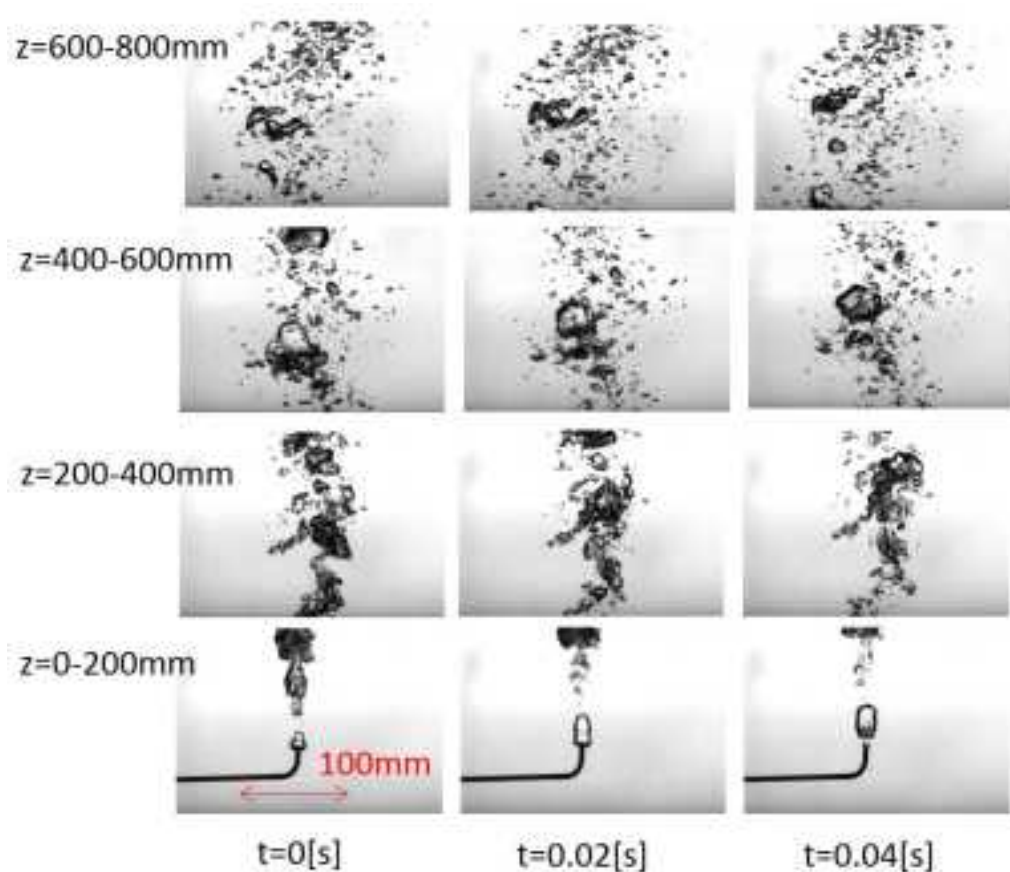


図 3-101 低流速気泡噴流挙動の高さ毎の可視化結果

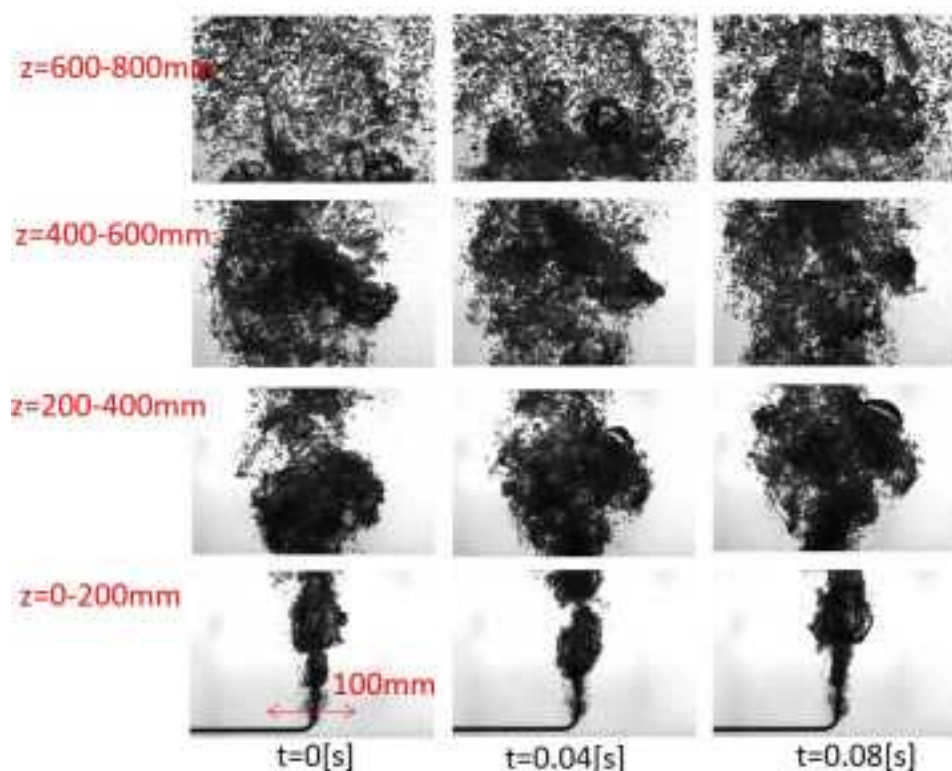


図 3-102 高流速気相噴流の高さ毎の可視化結果

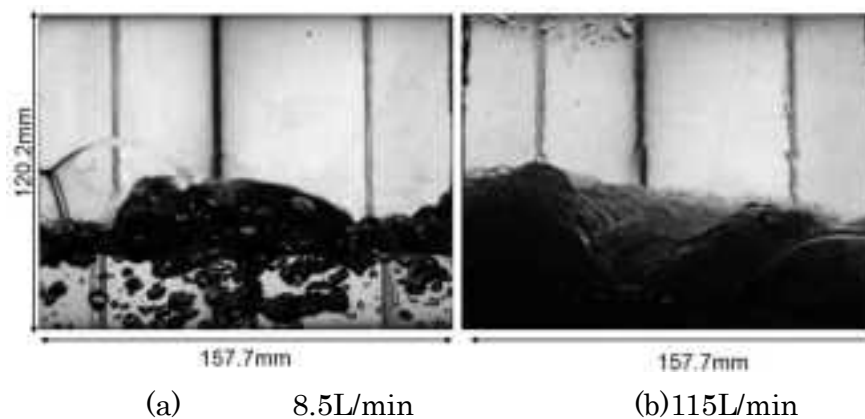


図 3-103 水面での可視化結果

高流速気相噴流中の気泡挙動の評価として WMS より計測した局所ボイド率分布を用いて気泡のナンバリングを行った．処理結果を図 3-104 に示す．図 3-104 より大気泡など，大まかな流動は捉えられていることが分かる．この処理結果より気泡径分布を取得した．流量を変化させた場合の高さ毎の気泡径分布結果を図に，流量を一定としてノズル径を変化させた場合の気泡径分布結果を図に，ノズル見かけ流速を一定としてノズル径を変化させた場合の気泡径分布結果を図に示す．図 3-105 より，全体としてノズル近傍においては気泡径の比較的小さな径と大きな径，2 つのピークが確認できる， $z=300\sim 900\text{mm}$ においてはおよ

そ対数正規分布に従うことが分かる．小気泡のピーク位置は全条件であまり変わりは見られなかった．流量依存性（図 3-105）に関しては $z=100\text{mm}$ において流量が小さくなるにつれてピーク値が低くなっていくことが示唆された．気相流量は左から順に 42.4L/min ， 84.8L/min ， 115L/min とした．気相流量を 84.8L/min 一定とした場合のノズル径依存（図 3-106）については生成ノズル径が大きくなるにつれて生成される気泡数が減少することが確認された．ノズル径は左から 3mm ， 6mm ， 10mm としている．ノズル見かけ流速を 50m/s 一定とした場合のノズル依存性（図 3-107）に関しては $z=100\text{mm}$ において，ノズル径が大きくなるにつれて生成される大気泡のピークが大きくなる方向にシフトすることが確認された．また $z=900\text{mm}$ においてはノズル径が大きくなるにつれてヒストグラムのピーク幅も大きくなることが確認された．実験条件は左から順に $3\text{mm}:21\text{L/min}$ ， $6\text{mm}:85\text{L/min}$ ， $10\text{mm}:236\text{L/min}$ としている．現状の気泡径分布はボイド率分布結果の流路端に表れているノイズは除去しているが，詳細な計測結果の妥当性についてはまだ行っていない．今後可視化観測可能な範囲に WMS センサの計測範囲を絞り，気泡径分布を取得することで比較することが必要になると考える．また 4 センサープローブなど他の計測により WMS から取得した気泡径の妥当性確認も必要であると考ええる．

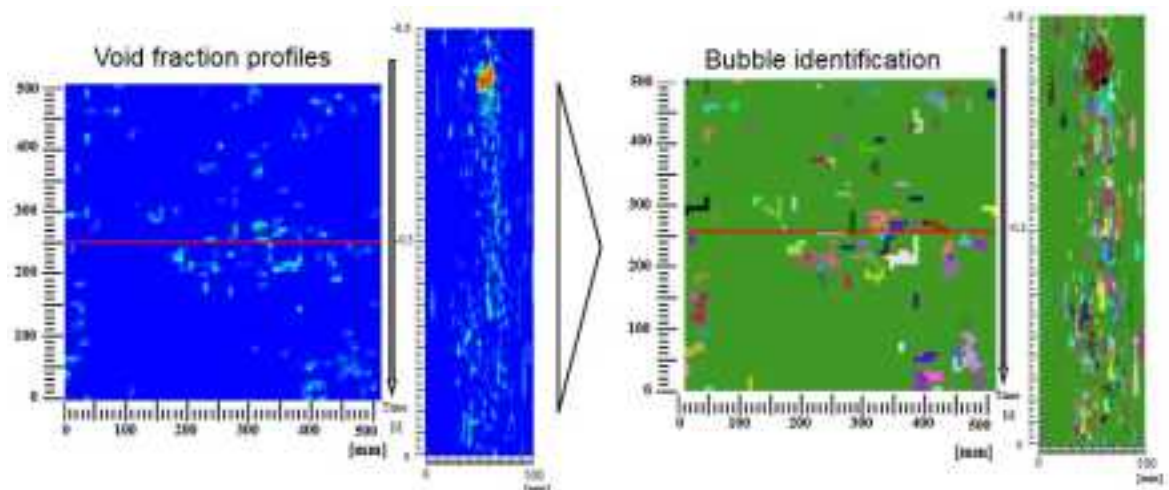


図 3-104 気泡のナンバリング処理

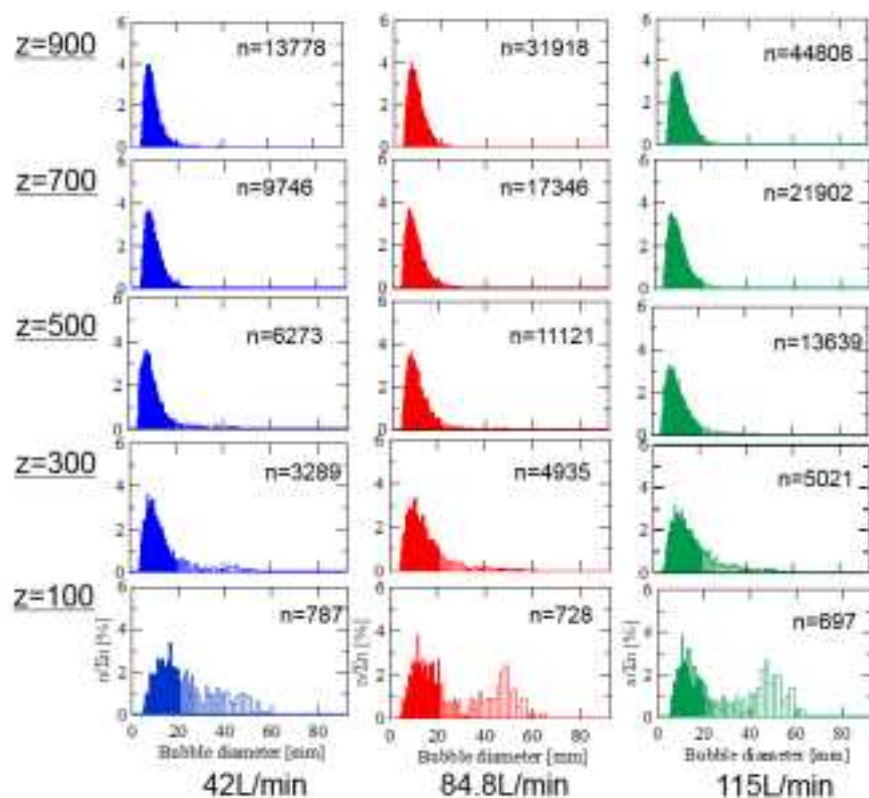


図 3-105 高さ毎の気泡径分布_流量依存性

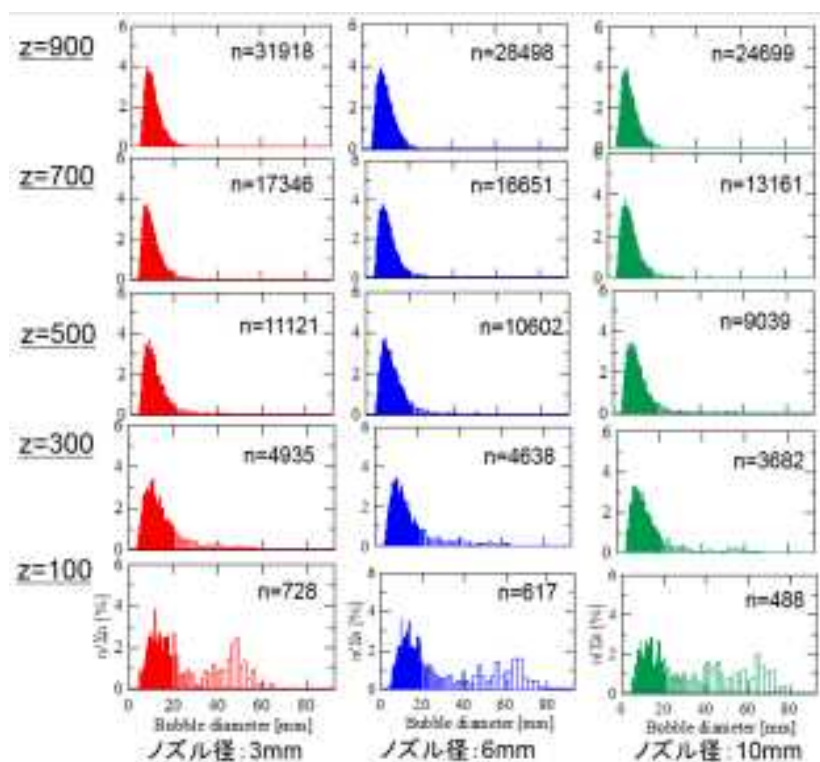


図 3-106 高さ毎の気泡径分布_ノズル依存性 (流量一定)

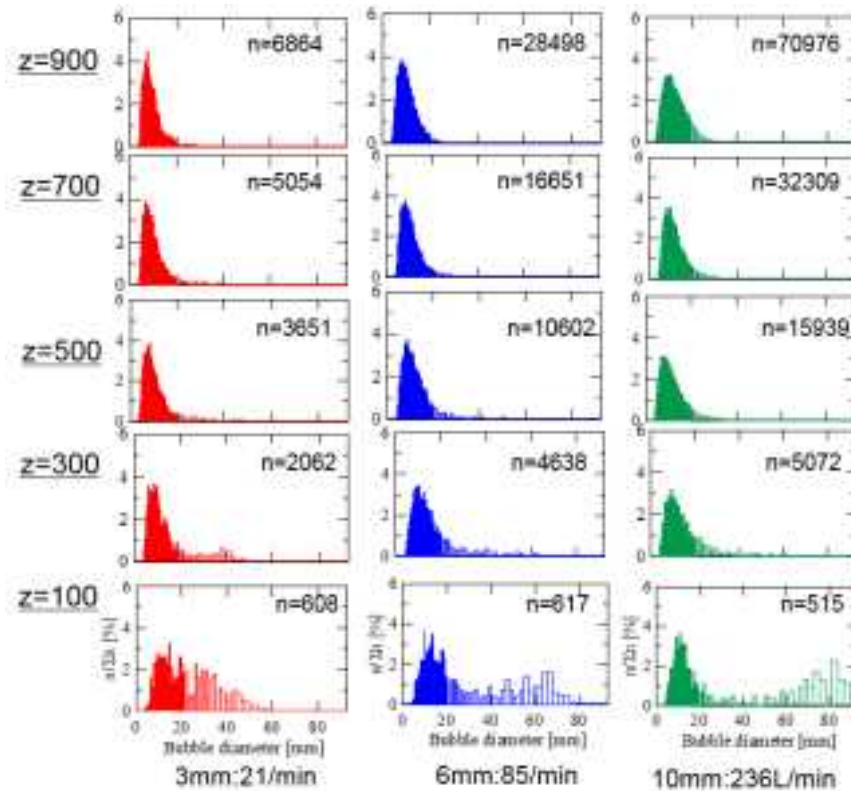


図 3-107 高さ毎の気泡径分布_ノズル依存性（流速一定）

可視化による気泡形状の評価についてはノズル先端から 200mm ごとの可視化画像より気泡径およびその長軸 a 、短軸 b を気泡の輪郭を 5 点プロットすることで計測した楕円近似した。アスペクト比の定義を以下に示す。

$$\text{Aspect ratio} = \frac{a}{b} \quad (3.17)$$

なお気泡径は面積等価直径を用いて評価した。図 3-108 に処理手順を示す。において気泡が重なっている場合も目視で判断できる気泡については処理対象とした。なお気泡の重なりが激しい場合や、解像度が 0.196mm/pix であるため直径 0.2mm 以下の気泡については除外した。対象とした画像はノズル先端 0~800mm 地点での画像で、126~512 個の気泡を処理した。高さ毎の気泡径分布を図 3-109 に示す。また下記の対数正規分布を用いて気泡径分布のフィッティングを行った。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.18)$$

図 3-109 よりどの高さ位置においても対数正規分布でフィッティングできることが確認されたが、 $z=100\text{mm}$ においてピークが分布より高くなることが分かる。原因として対象とした画像を見ると少数の大気泡と多数の小気泡のみで構成されていることから割合として小気泡が大きな割合を占めるためであると考えられる。また気泡数は計測位置が高くなるほど多くなることが確認できた。これは WMS より計測した結果と同様であることが分かる。現状の

計測は気泡の輪郭を手動で計測しているため、処理数が少なくまたどうしても主観が存在する。今後、画像処理の自動化および計測精度の向上をはかる必要がある。次にノズル先端から 800mm 付近において上昇気泡群中の一つの気泡の局所的な上昇速度を気泡の上昇速度の計測を行った。方法としては可視化動画より、ランダムに気泡を一つ選択し、その気泡の輝度重心を追跡することで高さ方向の速度を計測した。例として気泡径 4.2mm の気泡と 10.2mm の気泡の上昇速度の計測結果を図 3-111 に示す。グラフにおいてノイズのような評価になっている原因としては、対象の気泡を追跡する過程で周囲に存在する小さな気泡の重なりにより面積を過大評価したためによる重心位置の急激な変化であると考ええる。また WMS より気泡の上昇速度を手動計測した。計測手順は前述した WMS のナンバリングを上流側 WMS および下流側 WMS で行い、計測位置および形状が近ければ、その気泡の上昇速度を WMS の二層間の距離から計測した。処理画像を図 3-112 に示す。計測結果より気泡径と上昇速度を取得し、既存研究で挙げた Clift らの気泡形状線図に対応させた結果を図 3-110 に示す。結果より気泡の鬼面に揺らぎを含む領域であることが示された。また可視化および WMS から得られた気泡の上昇速度計測結果に Clift らの気泡の上昇速度にマッピングした結果を図 3-117 図 3-111 に示す。結果より単一気泡での終端速度に対して全体的により高速で上昇するという結果になった。これは、実験は単一気泡であるのに対して本実験は気泡群として上昇しているため流路中心に柱のようなプルーム流れが発生していると考えられ、その流れに気泡が誘起されたためであると考ええる。

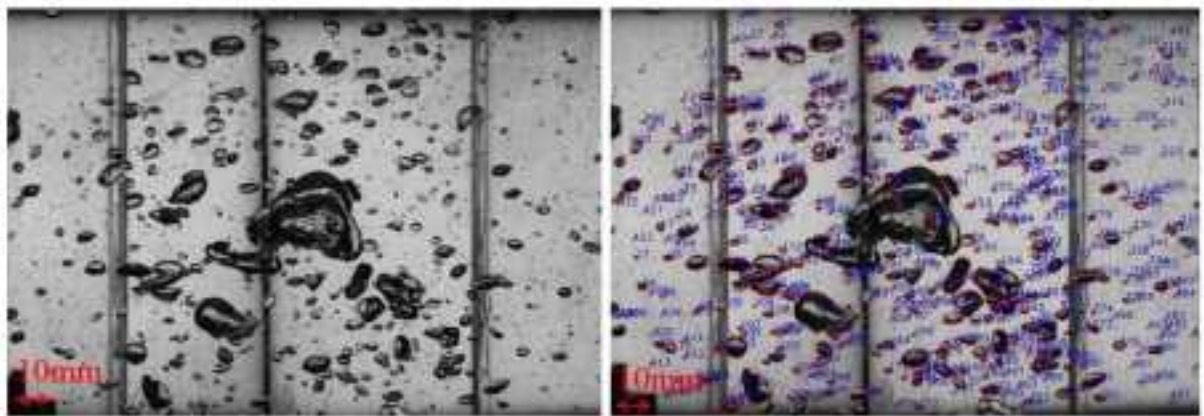


図 3-108 気泡径の測定手順

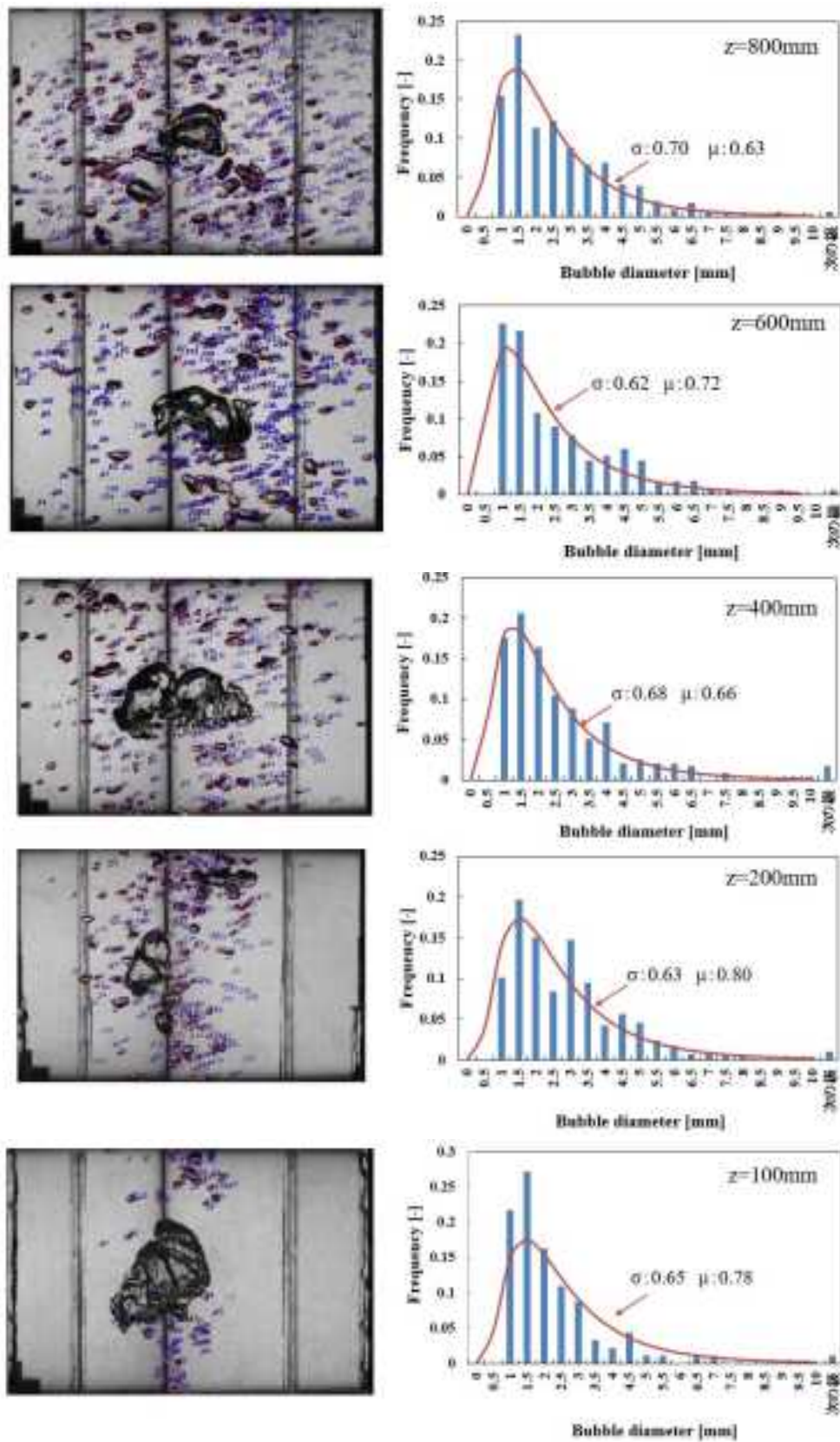


図 3-109 各高さ位置での気泡径分布と可視化画像

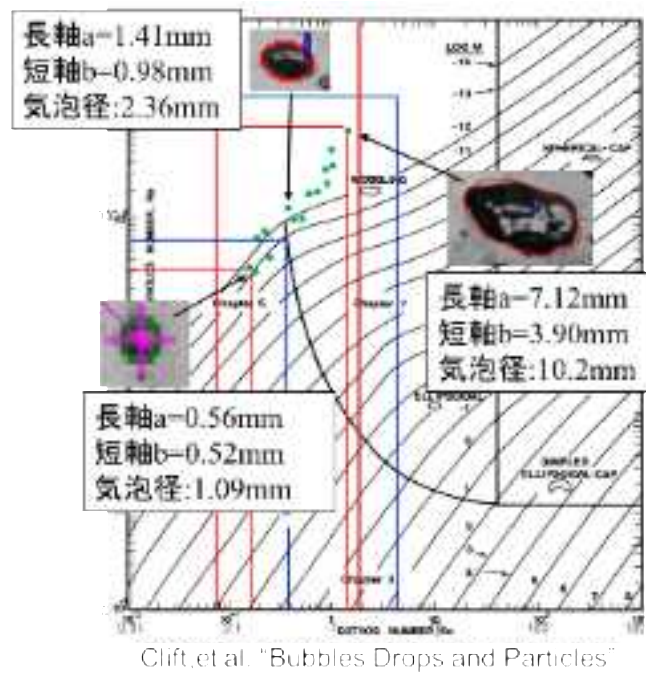


図 3-110 Clift らの気泡の形状評価にマッピングした結果

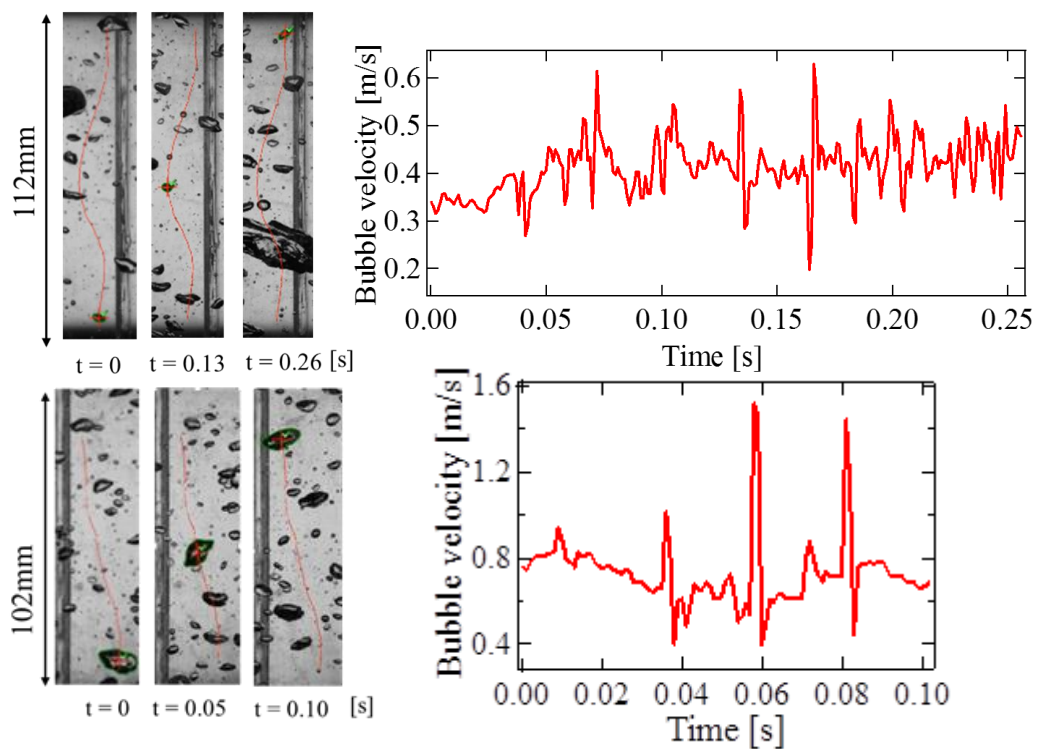


図 3-111 可視化による気泡群中の気泡の上昇速度

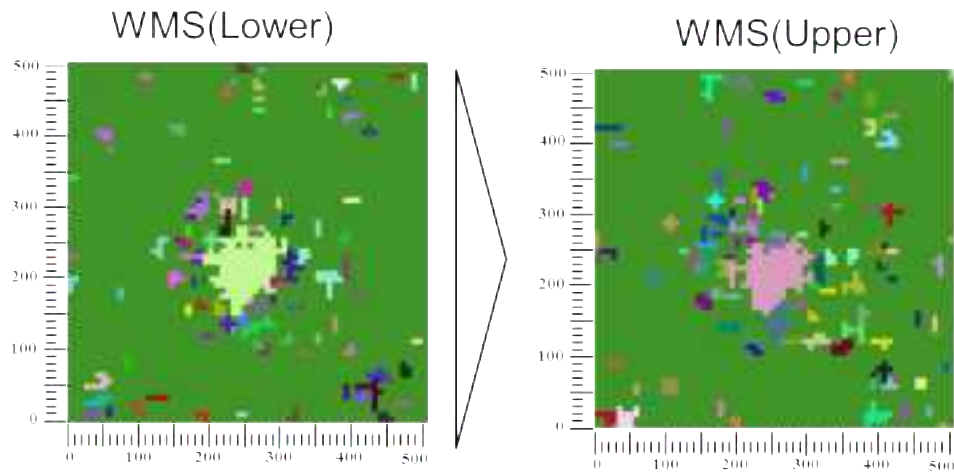


図 3-112 WMS による気泡の上昇速度計算の処理画像[]

1.2.7.16 エアロゾルを含む気泡挙動の評価

エアロゾルを含む場合と含まない場合の気泡の形状評価を行った。計測は図 3-108に示す前述した方法で行った。対象とした可視化画像を図 3-113に示す。計測は気泡群が安定的に上昇している部分であるノズル先端から800mm上部とした。また気相流量は4.2L/minとした。また対応する気泡径分布を図 3-114に示し、アスペクト比分布を図 3-115に示す。結果より気泡径分布の傾向はエアロゾルの有無に依らないことがわかる。一方アスペクト比分布はエアロゾルを含む場合において含まない場合に比べて球形状に近づくことが示唆された。エアロゾルを含むことにより剛体球の挙動を示すことが原因と考えられる。今回、エアロゾルの有無による気泡の形状への影響を目的として行ったため、気泡径が小さくエアロゾルを含まない場合においても球形状を示す気泡については除外した。また上昇速度に関しても前述した方法で計測した。計測結果を図 3-116に示す。図 3-111のエアロゾルを含まない気泡の上昇速度と比較すると気泡径に対して上昇速度が低くなることが示唆された。また今回エアロゾル混入の影響を顕著に示すように高濃度で混入させたが、今後詳細な議論をするためには実機条件の濃度で実験し、プロット数も増やす必要がある。

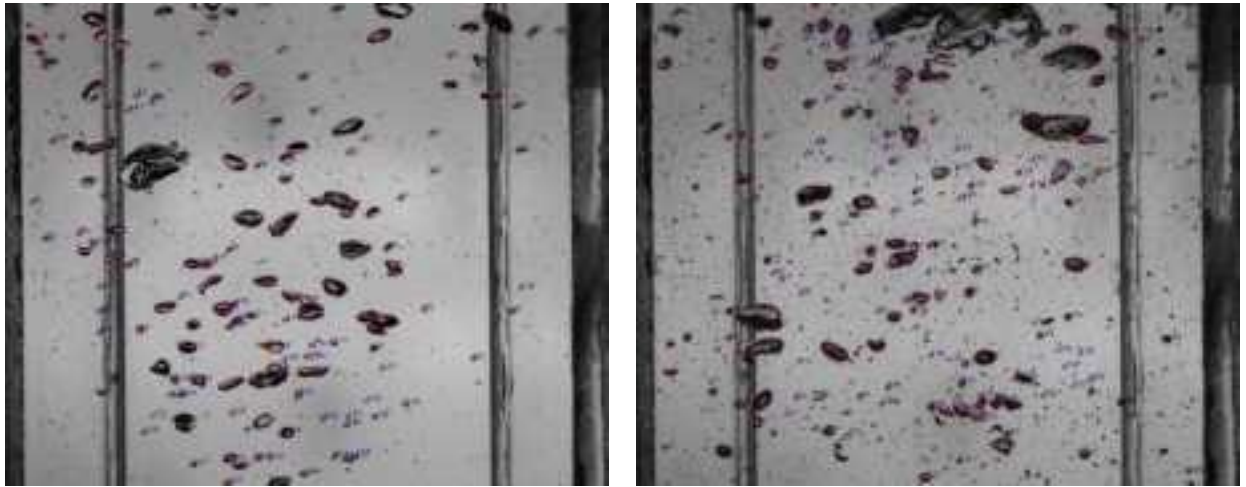


図 3-113 エアロゾルを含む気泡の可視化結果

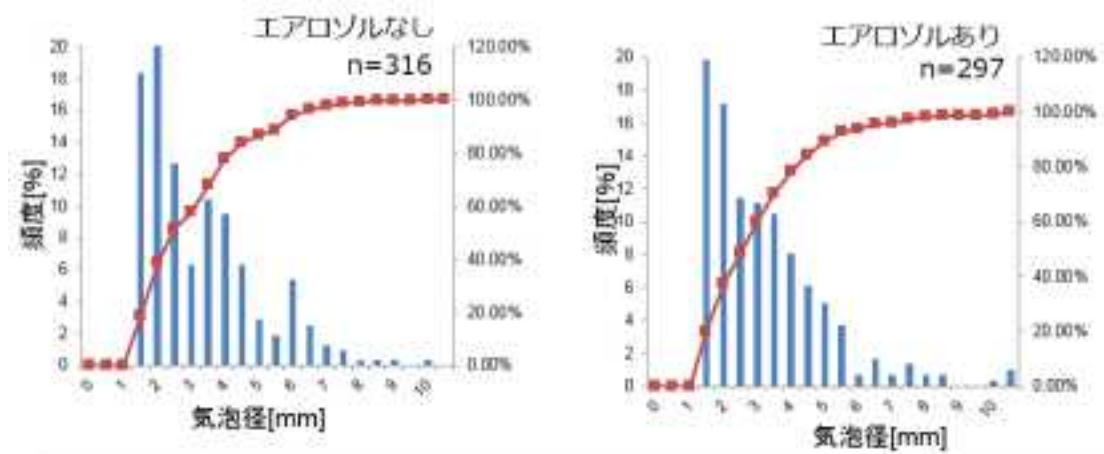


図 3-114 エアロゾルの有無による気泡径分布の違い

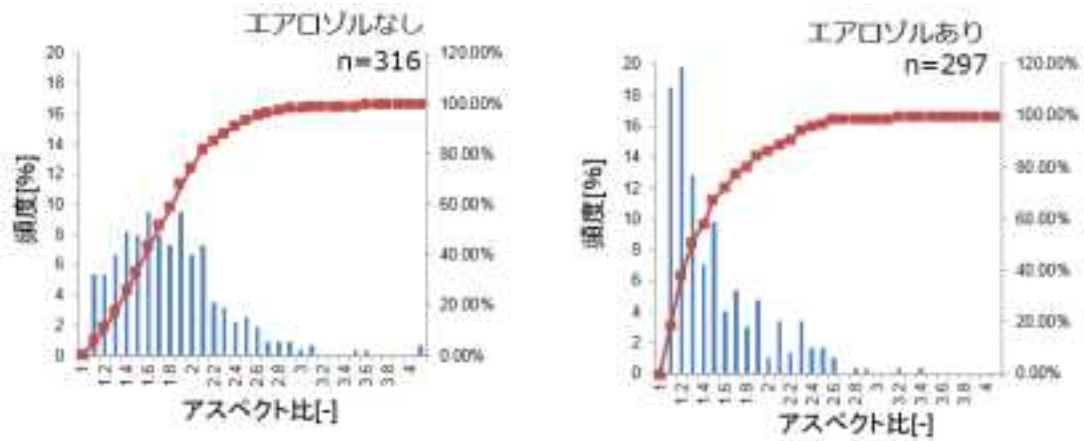


図 3-115 エアロゾルの有無によるアスペクト比の違い

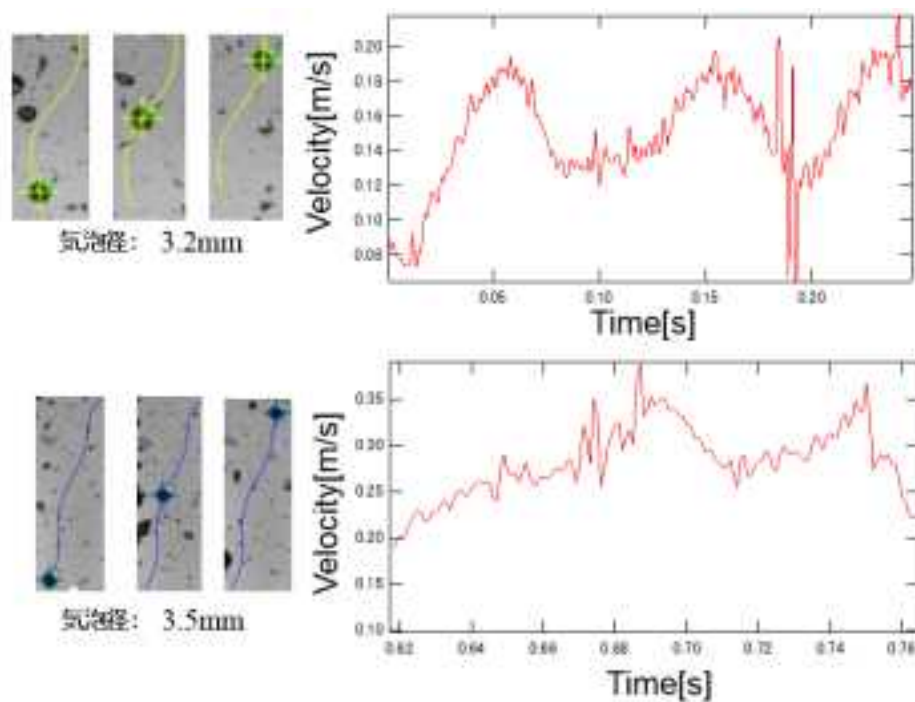


図 3-116 エアロゾルを含む気泡の上昇速度計測

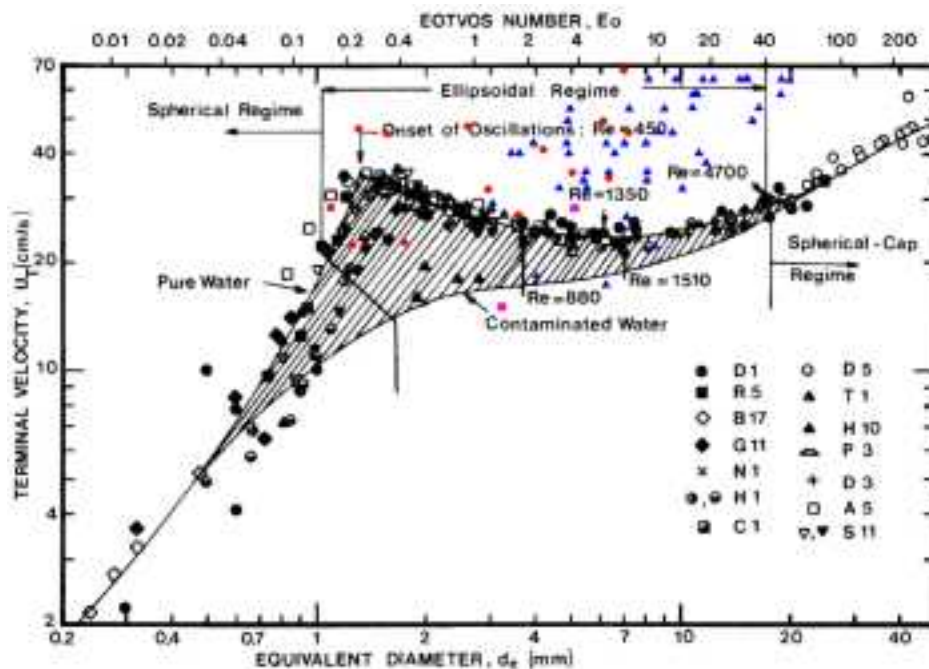


図 3-117 Clift らの気泡の上昇速度にマッピングした結果

1.2.7.17 水—蒸気系における気泡挙動の評価

水—蒸気系における気泡挙動を可視化観測した．結果を図 3-118に示す．結果よりサブクー

ル度80度程度においては蒸気がノズルから噴出することなく配管内で凝縮することが確認された。周囲流体に60°Cの温水を用いた場合においてはノズル出口付近で凝縮することが確認された。ノズル出口付近においてグローブールと考えられる気泡が確認できた。また非凝縮性ガスを用いた条件においては、ノズル出口で蒸気凝縮が起きた後に非凝縮性ガスによる微細気泡が生成されることを確認した。凝縮が起きた後、大気泡等は存在せず、微細気泡のみで構成された気泡群が安定的に上昇することが確認できる。これは解析コードに使用されている流動モデルのイメージ図と定性的に一致し流動モデルは非凝縮性ガスを含む凝縮を考慮したモデルであることが示唆された。今後凝縮後の蒸気凝縮性ガスの気泡径分布を計測していくべきと考え、ノズル出口付近においてはグローブールの体積や直径を計測し、モデルの計算値と比較する必要があると考える。また事故条件であるサブクール度5°C程度で蒸気を噴出させた場合の可視化実験を行うことも必要であるとする。

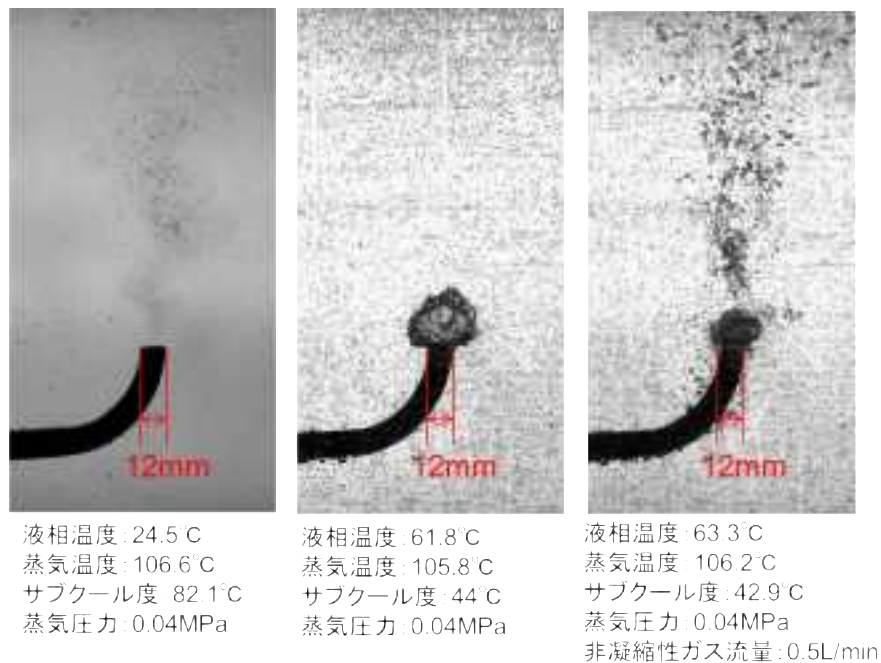


図 3-118 蒸気を用いたノズル出口での可視化結果

1.2.8 気相噴流中エアロゾル挙動の評価

気相噴流とそのエアロゾル挙動の相互関係を明らかにするためにそのためには気相噴流中のエアロゾル挙動を把握する必要がある。本章では気相噴流中にエアロゾルを混入させ、ノズル出口付近における流動の可視化、PIV 計測を行った。その結果を以下に記載する。

1.2.9 水—空気系における気相噴流中のエアロゾル挙動

水空気系におけるエアロゾルを混入させた低流速気相噴流の気泡内およびエアロゾルの液中移行挙動の可視化観測を行い、また比較的流速の高い気相噴流の界面を可視化することで噴流の流速による液中の移行挙動の違いを確認した。実験に用いたエアロゾル模擬粒子は配管内の流動を良くするため、微粉末シリカと蛍光粒子を 1:1 で混ぜた粒子を使用し、可視化においては高速度カメラにカラーフィルターや偏光フィルターを使用することでエアロゾル粒子のみの挙動を得る体系とした。

1.2.9.18 気泡内エアロゾル粒子挙動の可視化観測

水—空気系における低流速気相噴流にエアロゾルを混入させた場合の気泡内の可視化結果の時系列を図 3-119 に示す。可視化結果の気泡内の混入した粒子が白く煙のような模様で現れていることが確認できる。可視化結果より気泡がノズルから離脱する際に気泡内において非常に高速で上向きの流れが生じ、気泡界面に衝突後は左右に下降し渦を形成することが確認された。離脱後は形成された渦は形を崩しながら複雑な流れになっていく様子が確認される。以上より、ノズルの離脱による気泡の変形が気泡内の流れの駆動力になっていることが示唆された。

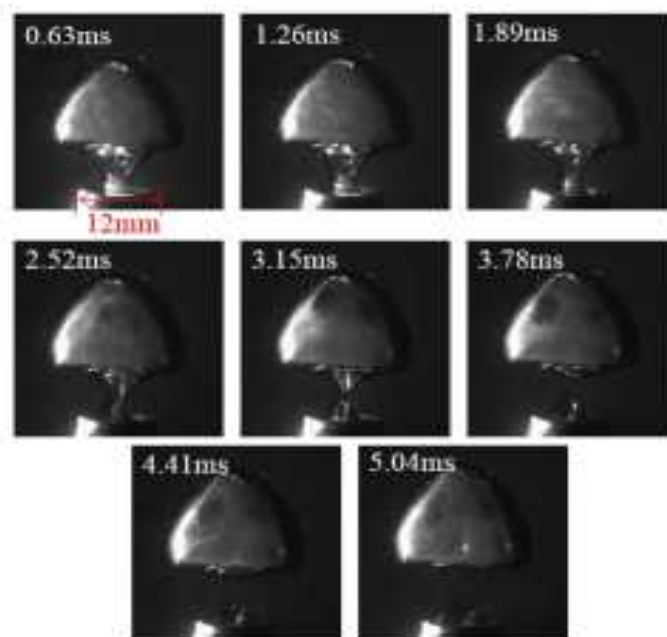


図 3-119 気泡内エアロゾル挙動の可視化

1.2.9.19 エアロゾル粒子の液中移行挙動の可視化観測

低流速気相噴流中の大気泡上昇中のエアロゾルの液中移行挙動可視化計測した。その結果を図 3-120 に示す。結果より気泡が上昇する過程で局所的に気泡界面の流れに置いて行かれるように粒子が液相に移行する挙動が確認できる。この際の気泡の寸法は 19.2mm 程度であった。

また図 3-121 に示すように液相に移行した粒子をピクセル数から概算した結果、92 μm ~733 μm 程度であった。液相移行時の瞬時 PIV 計測結果を図 3-122 に示す。PIV 結果より液相移行時において気泡の上昇方向に対して垂直に流れが生じていることが確認できる。流れのオーダーは 30mm/s 程度であることも確認された。高流速気相噴流の界面における液相移行挙動の可視化観測、PIV 計測を行った。結果を図 3-123 に示す。結果より、気相界面の揺らぎや膨らみによってエアロゾル粒子が液相に移行することが確認された。移行する箇所としては気相の界面および気泡後流部分であることも確認された。また低流速噴流と同様に図 3-124 に示すようにピクセル数から粒子径を概算した結果、42 μm ~538 μm であり低流速気相噴流より移行する粒子径が小さいことが示唆された。最大の粒子径も小さくなった原因としては低流速条件においては複数の粒子が塊となって移行したためと考えられ、高流速条件においては粒子がある程度分散したため最大の粒子径が小さくなったと考えられる。移行する粒子数も流速が高い条件のほうがより多くの粒子が移行することが確認された。高流速噴流の液中移行時の瞬時 PIV 計測結果を図 3-125 に示す。結果より低流速気相噴流条件と同様に気相の上昇方向に対して垂直な流れが生じていることが分かる。流れの速度は最大で 400mm/s 程度であることが確認された。これは低流速条件に比べて 10 倍程度の速度であることが分かった。以上の結果を踏まえるとノズル出口付近において、粒子が液相に移行する量は気相噴流の界面流速によることが示唆された。液相移行後の粒子は図 3-126 に示すように気相の界面に沿って下降し、気相の下部に到達すると気相の後流に誘起され、液相を上昇することが確認された。今後、得られた可視化結果とエアロゾル計測結果と併せて評価することで、解析モデルの妥当性確認を行う。

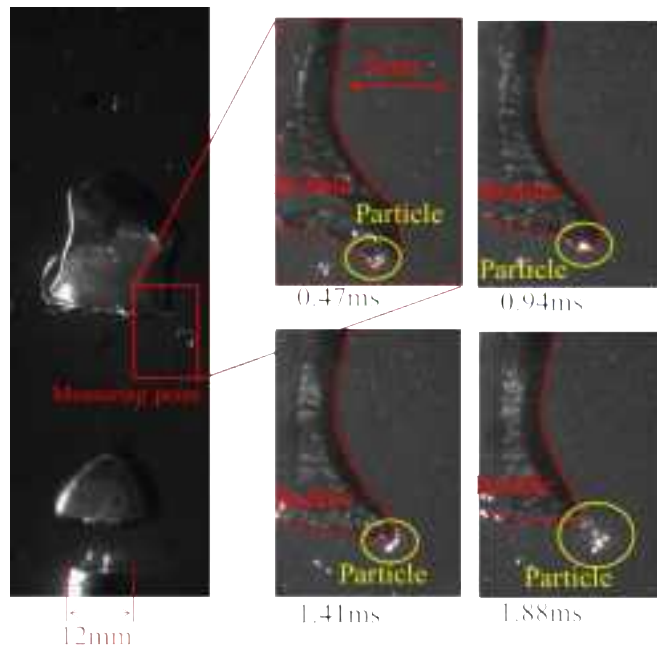


図 3-120 水-空気系におけるエアロゾルの液中移行挙動

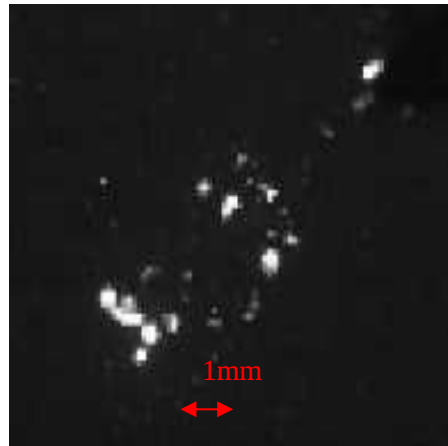


図 3-121 移行したエアロゾルの粒子径の概算

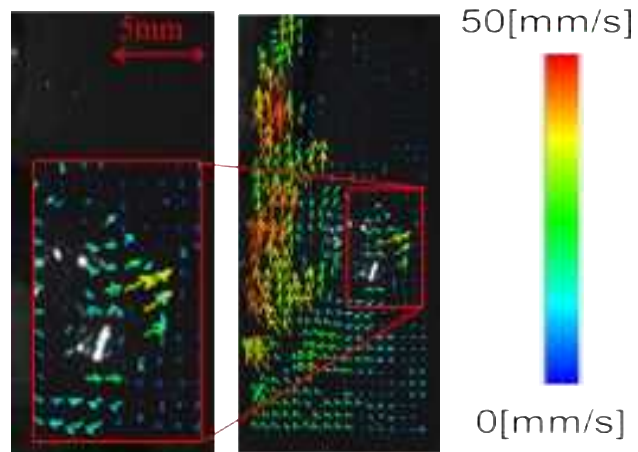


図 3-122 低流速気相噴流の液中移行時の瞬時 PIV 計測結果

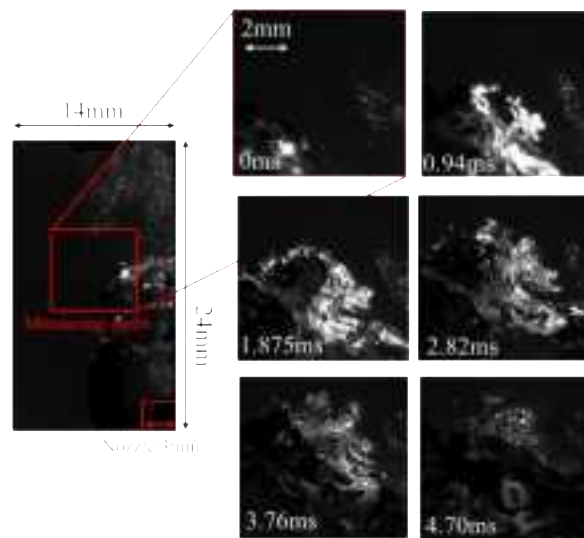


図 3-123 気相噴流界面におけるエアロゾルの液中移行挙動

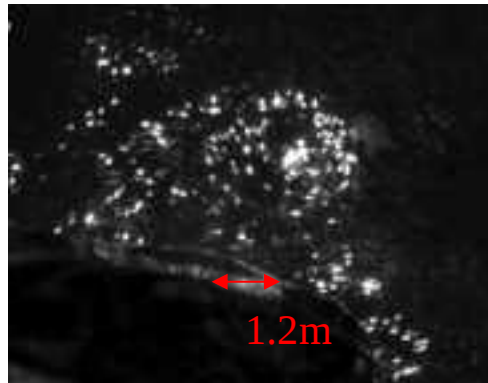


図 3-124 移行したエアロゾルの粒子径の概算

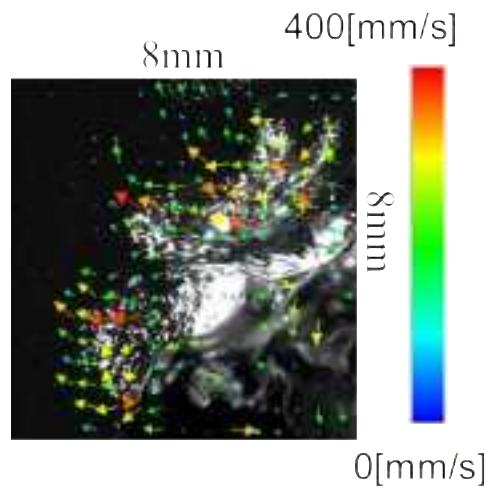


図 3-125 液中移行時の瞬時 PIV 計測

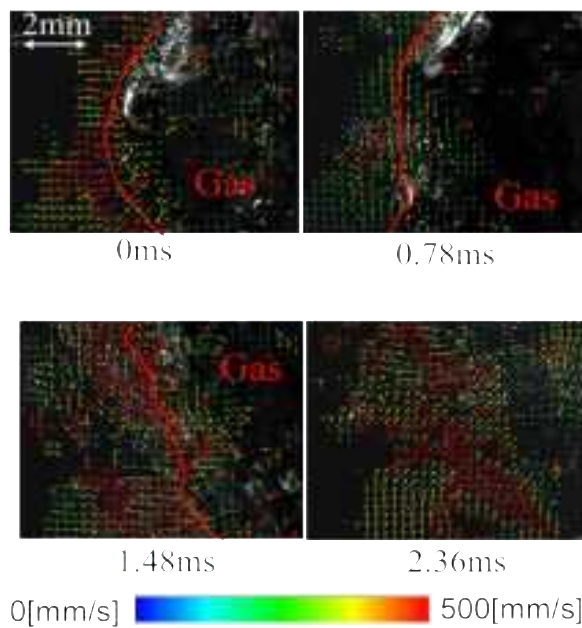


図 3-126 気相噴流界面の液中移行時の時系列 PIV 計測

1.2.10 水—蒸気系における気相噴流中のエアロゾル挙動

水—蒸気系におけるエアロゾルを含む低流速気相噴流の可視化結果を図 3-127 に示す．液相の温度は 60℃，蒸気温度は 114℃程度であったため，サブクール度は 40℃程度の条件である．結果より水—蒸気系においては気泡内の全ての粒子が液相に移行することが確認できる．また PIV 計測結果を図 3-128 に示す．結果より液相移行後の粒子の回転挙動が確認できる．解析モデルにおいても凝縮による除染の割合は非常に大きいとされており，モデルの同様の傾向を示していると考えられる．今後，水—空気系条件と同様に可視化結果と併せて，凝縮による除染係数を評価することで解析モデルの妥当性確認を行う．また今回の実験においては液相移行後の粒子の回転挙動が確認できたが，凝縮する瞬間の PIV 計測は凝縮により粒子が集中したことにより計測が困難であった．今後エアロゾル粒子の濃度を低くすることで PIV 計測していく必要があると考える．

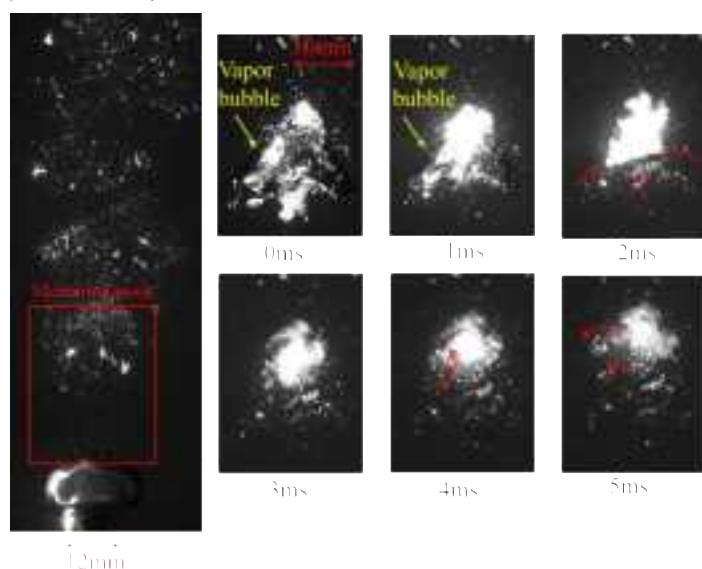


図 3-127 蒸気凝縮によるエアロゾルの液中移行挙動

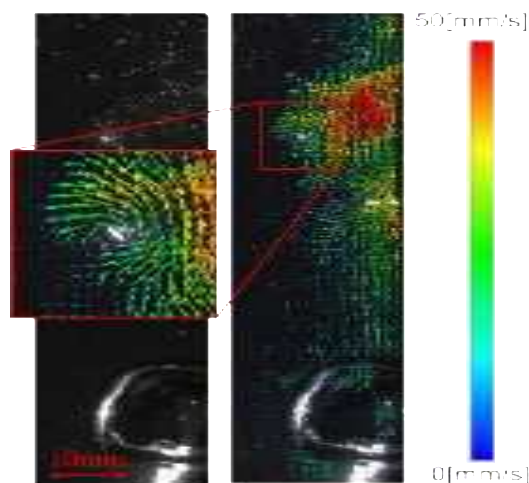


図 3-128 凝縮後のエアロゾルの回転挙動

1.2.11 解析モデル式比較とその除染評価

スクラビング解析モデルの高度化又は妥当性確認への試験データの活用を念頭に置き，仕様に記載されている計測項目を取得し，取得した実験データから，二相流動に関する各種パラメータのエアロゾル除去効果への影響を整理し，解析コード中の物理モデルを，また過去文献等との試験結果の比較を行い，試験データの検証を行う．モデルの詳細を記載する．

式 3.19 に全体の DF を示す

$$DF_{OV,i} = DF_{EC} \times DF_{II,i} \times DF_{ER,i} \times DF_{SR,i} \quad (3.19)$$

3.19 においての遠心拡散およびブラウン拡散による $DF_{SR,i}$ を表す式を以下に示す．

$$DF_{SR,i} = \frac{1}{f_{gl} + \frac{(1-f_{gl})}{DF_{BB,i}}} \quad (3.20)$$

ここで $DF_{BB,i}$ は気泡内での除去要因を表し， $f_{g,i}$ は初期グローブユール内の気相割合を表す．次に式以下の式に $DF_{BB,i}$ を示す．

$$DF_{BB,i} = \exp \left[\frac{\Delta t}{v_b} \int A_{surf} V_{n,i} dA \right] \quad (3.21)$$

$DF_{BB,i}$ は，気泡体積 v_b ，気泡の表面積 A_{surf} ，気泡界面に向かう粒子の速度 $V_{n,i}$ で構成されており，式の中で気泡界面に向かう粒子の速度 $V_{n,i}$ の表記があったためこの式の値と，実験によって取得した粒子の速度を比較する．以下に気泡界面に向かう粒子の速度 $V_{n,i}$ について示す．

$$V_{n,i} = V_{c,i} + V_{D,i} - V_{g,i} \cos \beta - V_v \quad (3.22)$$

気泡界面に向かう粒子の速度 $V_{n,i}$ は，遠心力の効果 $V_{c,i}$ ，ブラウン拡散の効果 $V_{D,i}$ ，沈降速度の効果 $V_{g,i} \cos \beta$ ，蒸発・凝縮による界面蒸気フラックス V_v で評価されており，本実験では蒸気を混入していないため，粒子の速度を求めるうえでブラウン拡散の効果と蒸発・凝縮による界面蒸気フラックスは無視し計算を行った．次に，遠心力の効果 $V_{c,i}$ を表す式以下の式を示す．

$$V_{c,i} = V_{g,i} \left(\frac{V_s^2 / r_c}{g} \right) \quad (3.23)$$

遠心力の効果 $V_{c,i}$ 中には気泡の曲率半径 r_c ，気泡の表面速度を表す V_s ，重力加速度 g が考慮されている．以下の式にて気泡の曲率半径 r_c について示す．

$$r_c = \frac{1}{ab} \left[\frac{a^4 \cos^2 \theta + b^4 \sin^2 \theta}{a^2 \cos^2 \theta + b^2 \sin^2 \theta} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (3.24)$$

気泡の曲率半径 r_c は，にもあるように気泡の長軸 a ，短軸 b ，気泡の中心から粒子までの角度 θ より構成されている．また以下の式にて気泡の表面速度を表す V_s について説明する．

$$V_s = \frac{-V_r \left(\frac{r \sin \theta}{a} \right)}{\left[\left(\frac{r \cos \theta}{b} \right)^2 + \sinh^2 \xi_o \right]^{\frac{1}{2}}} \frac{1}{\left[\sinh \xi - \cosh^2 \xi_o \cot^{-1}(\sinh \xi_o) \right]} \quad (3.25)$$

気泡の表面速度を表す V_s は気泡の上昇速度を表す V_r と以下の式に示す要素で構成される.

$$\begin{aligned} \sinh \xi_o &= \left[\left(\frac{a}{b} \right)^2 - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \\ \cosh \xi_o &= \left[1 - \left(\frac{b}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ r &= \left[\left(\frac{\sin \theta}{a} \right)^2 + \left(\frac{\cos \theta}{b} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (0 \leq \theta \leq \pi) \end{aligned} \quad (3.26)$$

また, 沈降速度の効果 $V_{g,i} \cos \beta$ を式(6.17)に示す.

$$V_{g,i} = \frac{\rho_l g S_i d_i^2}{18\mu} \quad (d_i \leq 70 \mu m) \quad (3.27)$$

沈降速度の効果 $V_{g,i}$ は, 水の粘性係数 μ , 微粒子密度 ρ_i , 気泡の表面積 S_i , 微粒子径 d_i から構成されている. $\cos \beta$ 中の β については以下の式に示す.

$$\beta = \tan^{-1} \left[\frac{b^2 \tan \theta}{a^2} \right] \quad (3.28)$$

β 中には, 気泡の長軸 a , 短軸 b , 気泡の中心から粒子までの角度 θ が考慮されている. また式(3.24)に使用されている気泡の長軸 a および短軸 b は以下の式で表される.

$$a/b = 0.817 + 1.13466 d_{vm} - 0.3795 d_{vm}^2 \quad (0.15 < d_{vm} < 1.3) \quad (3.29)$$

上式は気泡径 d_{vm} が 0.15 より小さい場合において扁平率は 1 とし, また d_{vm} が 1.3 より大きい気泡に関しては 1.675 とされている. また式(3.25)の気泡の上昇速度は以下の式で表される.

$$V_r = 7.876 \left(\frac{\sigma}{\rho_l} \right)^{1/4} \quad (3.30)$$

上記の式は気泡径が 0.5cm 以下において適応できるものである. ここで σ は表面張力, ρ は密度, 添え字の l は液相を示している

$$V_r = 1.40713 \left[7.876 \left(\frac{\sigma}{\rho_l} \right)^{1/4} \right] d_{vm}^{0.49275} \quad (3.31)$$

上記の式は気泡径 d_{vm} が 0.5cm 以上に於いて適応できる式となっており, 式(3.30)を使用して計算している. 式(3.21)の除染時間 Δt を求める際にはスウォームの上昇速度を用いる. 以下に計算過程を示す. (3.32)は高さ毎のスウォームの平均上昇速度を表した式になる.

$$V_{sw} = \left[\frac{(Q_s + 5.33)}{3.011 \times 10^{-3}} \right]^{\frac{1}{2}} [1 - 3.975 \times 10^{-4} Z] \quad (3.32)$$

ここで Q は気相流量、 z はノズルからの位置とする．さらに以下の式よりプールにおける平均の上昇気泡群速度を計算する

$$\overline{V}_{sw} = 0.5[V_s(x=0) + V_s(x=h_p)] \quad (3.33)$$

ベント出口付近の速度 $V_s(x=0)$ 及びプール水面での速度 $V_s(x=h_p)$ を用いた相関式であり、気泡がプール水中に滞留する時間すなわち除染時間と考えられる時間を以下の式で求める

$$t_b = \int_0^{h_p} \frac{1}{V_{sw}} dx \quad (3.34)$$

上式は SPARC-90 には記載されているが MELCOR のリファレンスマニュアルには記載されていないため、解析コードにおいて使用されているかは再度確認する必要があると考える．

1.2.11.20 高さ毎のスウォーム平均速度の比較

MELCOR 解析モデル内に使用されている流動モデルの中からスウォーム上昇速度の式の比較結果を図 3-129 に示す．図の中に示されている実線は MELCOR で使用されている式を用いて表示したもので式(3.32)で表される．また赤、青、緑はそれぞれ気相流量 254L/min, 84.8L/min, 8.48L/min である．比較結果より MELCOR に使用されている式と WMS より計測した実験値のオーダーは一致していることが分かる．また WMS から計測した気相界面速度分布をその噴流範囲全体での平均値を用いた．小流量条件においては $z=100\text{mm}$ を除いてほぼ一致していることが確認でき、中流量および大流量条件においてはどちらも実験値を過小評価していることが確認された．また計測位置ごとに見ていくと $z=100\text{mm}$ においては全条件で大きく差異が見られる結果となり、 $z=300\sim 900\text{mm}$ においてはほぼ横ばいの値となっており、解析モデル式において流量とノズルからの位置のみに依存する計算式であるが、図 3-130 に示す流量を一定とした場合の実験結果より $Z=100\text{mm}$ を除いて同様の傾向を示していることが確認できる．これは気相噴流の速度が終端速度に達しているためと考える． $Z=100\text{mm}$ における大きな差異については解析モデルの適用領域ではない可能性が示唆された．また前述した気相噴流の中心軸上のボイド率においても 300mm 程度で流動様式の遷移が示唆されたため、スウォーム上昇領域は既存研究における浮力領域であると考えられる．現状、MELCOR 解析モデル内にノズル出口近傍の気相の速度の式は発見できておらず、除染評価としては式に記載されているとおり流量が増加すると速度が上昇し、水中での滞留時間が短くなり、DF は減少傾向を示すため、現状の解析モデルは実験値を過大評価していると言える．今後、さらなる解析モデルの調査を行い、流域の遷移点やパラメータ定義など評価していく必要があると考える．

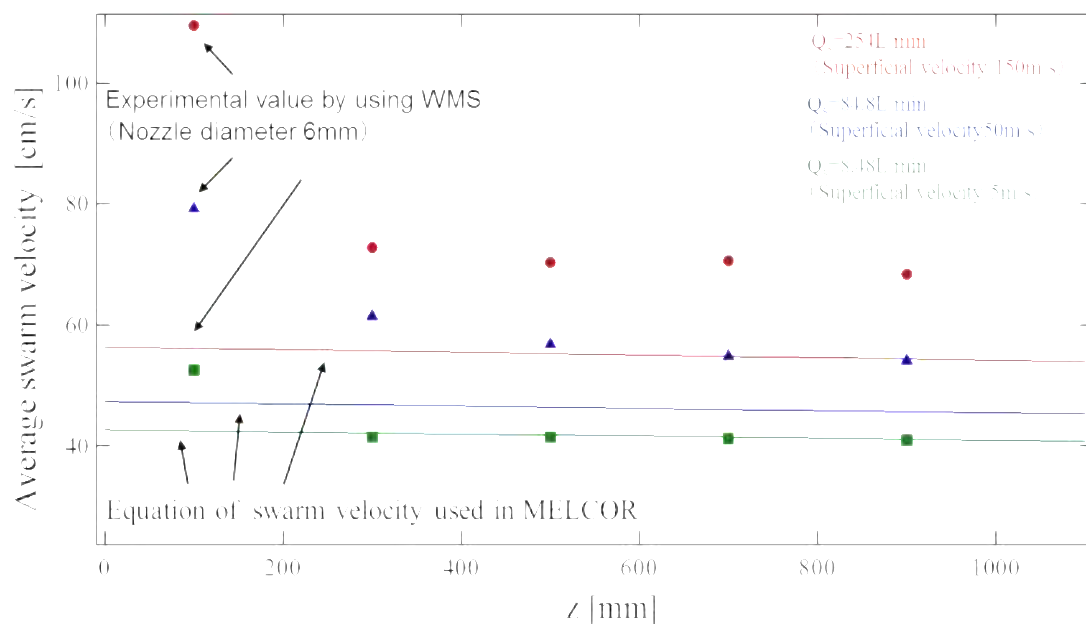


図 3-129 スウォーム上昇速度の式の比較（流量変化）

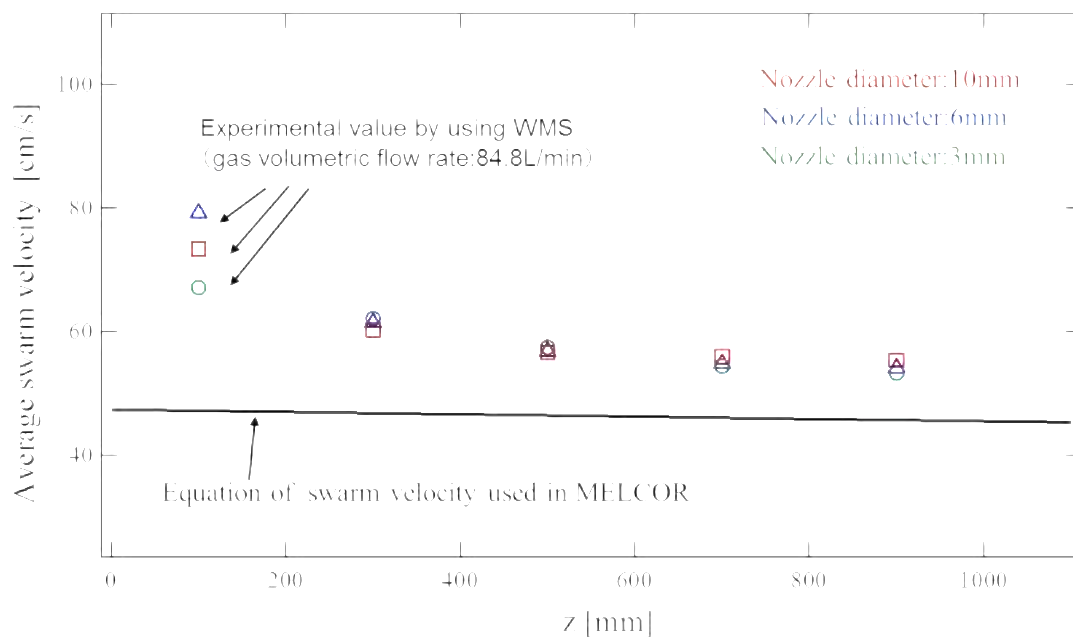


図 3-130 スウォーム上昇速度の式の比較（ノズル径変化）

1.2.11.21 気泡の扁平率の比較

図に MELCOR 解析モデルに使用されている気泡の扁平率の式と可視化観測より得られた気泡の扁平率の比較結果を図 3-131 示す。図中に示されている実線は既存研究に示されている wellek らの単一気泡径に対する扁平率の実験式であり、以下で表される

$$\frac{a}{b} = \frac{1}{1 + 0.163E_o^{0.757}} \quad (3.35)$$

E_o は以下の式で表される.

$$E_o = \frac{g(\rho_L - \rho_G)d_B^2}{\sigma} \quad (3.36)$$

ρ は密度, D_{eq} は気泡の体積等価直径, μ は液相粘性係数, σ は表面張力, 添え字の L は液相, G は気相とする. 図 3-131 より可視化より得られた結果は各式よりも扁平した気泡が多数存在していることが確認された. また Wellek の実験式と解析モデルの計算式と比較すると径が小さい場合においてある程度一致するが, 径が大きくなるにつれて Wellek の実験式のほうがより扁平する評価であることが確認された. 実験値は気泡群中の気泡の形状の評価であるのに対して wellek の実験式は単一気泡のみの形状であるため, 流路中心に柱状の流れが発生し誘起されることにより気泡の上昇速度は単一気泡のみの場合より増加する傾向になることが推測され, 上昇速度増加により気泡の Re 数が増加すると clift らの気泡形状のマッピングにおいて本実験の範囲においてより扁平方向に推移したと考えられる. 解析モデルに使用されている式が実験値を全体的に過小評価することが確認された. また気泡径 0.15cm より小さい場合において扁平率は 1 としているが, 実際の気泡は上記の範囲においても扁平していることが確認された. 過小評価の原因としては, 主に 2 つ考えられる. 解析モデルに使用されている式が, 気泡群中の気泡形状を評価したものではなく, 単一気泡のみの場合の形状評価したものである可能性である. そのため wellek の実験式と同様の傾向を示すことにも合致する. 2 つ目はエアロゾルを含む場合には扁平しにくく, 球形状かつ剛体球のような挙動に近づくことが報告されているので, 解析モデルの式がエアロゾルを含む気泡の形状評価をしているためエアロゾルを含まない場合には過小評価することになったと考えられる. 今後は, より気相流量およびノズル径, またエアロゾル濃度など, パラメータを増やし検討していく必要があると考える. 気泡の形状は単一気泡内でエアロゾルの速度を求める際に用いる. 除染評価としては気泡の扁平率は気泡の曲率半径を計算し重力沈降による速度と遠心加速度, 重力加速度から遠心による粒子速度を計算していることを確認できているが扁平であることが除染評価にどのような影響を与えるかについては今後の検討課題とする.

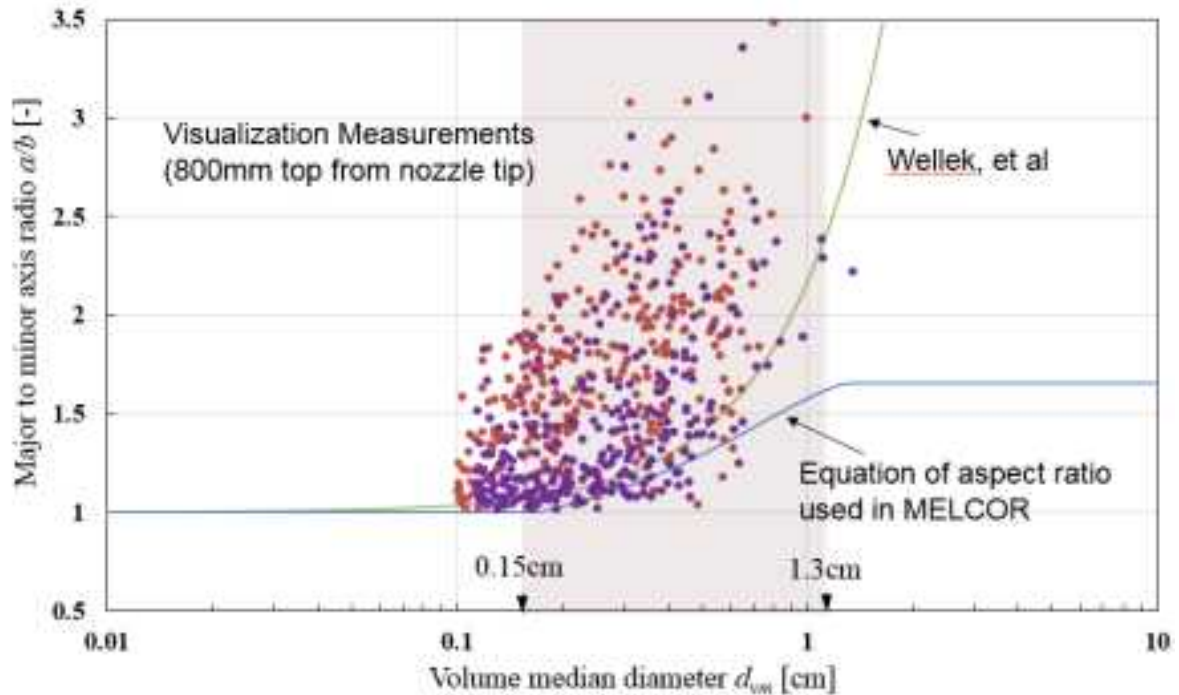


図 3-131 気泡の扁平率の比較結果

1.2.11.22 気泡の上昇速度の比較

図に MELCOR 解析モデルに使用されている気泡の上昇速度の式と可視化観測および WMS より得られた気泡の上昇速度の比較結果を図 3-132 示す。図中に示されている実線は MELCOR に使用されている気泡の上昇速度の式であり式(3.30)(3.31)で表される。また既存研究で示した Ishii-Chawla の水空気系における単一気泡の径に対する終端速度の計算式を示す。終端速度を求めるには空気抵抗を考慮した気泡の運動方程式を考える。以下に示す

$$m \frac{dv}{dt} = mg - D \quad (3.37)$$

D は抗力でニュートンの抵抗法則より抗力 D は以下の式で表される。

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho v^2 S \quad (3.38)$$

C_D は抗力係数、 S は気泡の面積であるが、楕円体である気泡は面積等価した円として用いる

ここで Ishii-Chawla らによって気泡の水-空気系における抗力係数の相関式を以下に示す

$$C_D = \max \left[\frac{24}{Re} (1 + 0.1 Re^{0.75}), \min \left[\frac{2}{3} \sqrt{E_0}, \frac{8}{3} \right] \right] \quad (3.39)$$

上記の計算式は 3 パターンで場合分けがされている。0.2cm 未満において気泡の上昇速度は

以下の式で表される。

$$v = \sqrt{\frac{mgRe}{12\rho S(1 + 0.1 Re^{0.75})}} \quad (3.40)$$

0.2~1.0cm においては以下の式で表される.

$$v = \sqrt{\frac{3mg}{4\rho S}} \quad (3.41)$$

1.0cm を超える場合は以下の式で表される.

$$v = \sqrt{\frac{3mg}{E_o^{\frac{1}{2}}\rho S}} \quad (3.42)$$

Re は気泡のレイノルズ数とし, 以下の式で示される.

$$Re = \frac{\rho_L u_T D_{eq}}{\mu_L} \quad (3.43)$$

ρ は密度, u_T は気泡終端速度, D_{eq} は気泡の体積等価直径, σ は表面張力, 添え字の L は液相とする. 比較結果としては, MELCOR で使用されている式と Ishii-chawla の実験式は 0.2cm~0.5cm のほぼ一致することが確認された. しかし 0.5 以上の範囲においては MELCOR で使用される計算式のほうがより高速で上昇する評価であることが確認された. 実験結果は全体的に各式よりも高速で上昇することが確認された. 以上を踏まえると MELCOR の計算式は単一気泡ではなく気泡群としての評価式であるが, 実験値よりは過小評価であるということが分かる. 除染評価としては式より気泡の上昇速度が増加すると気泡の表面速度が増加し, 遠心力の効果が增加するため, 気泡界面に向かうエアロゾル粒子の速度が増加するため DF としては増加する傾向を示すため, 解析モデルにおいては実験値を過小評価することが確認された.

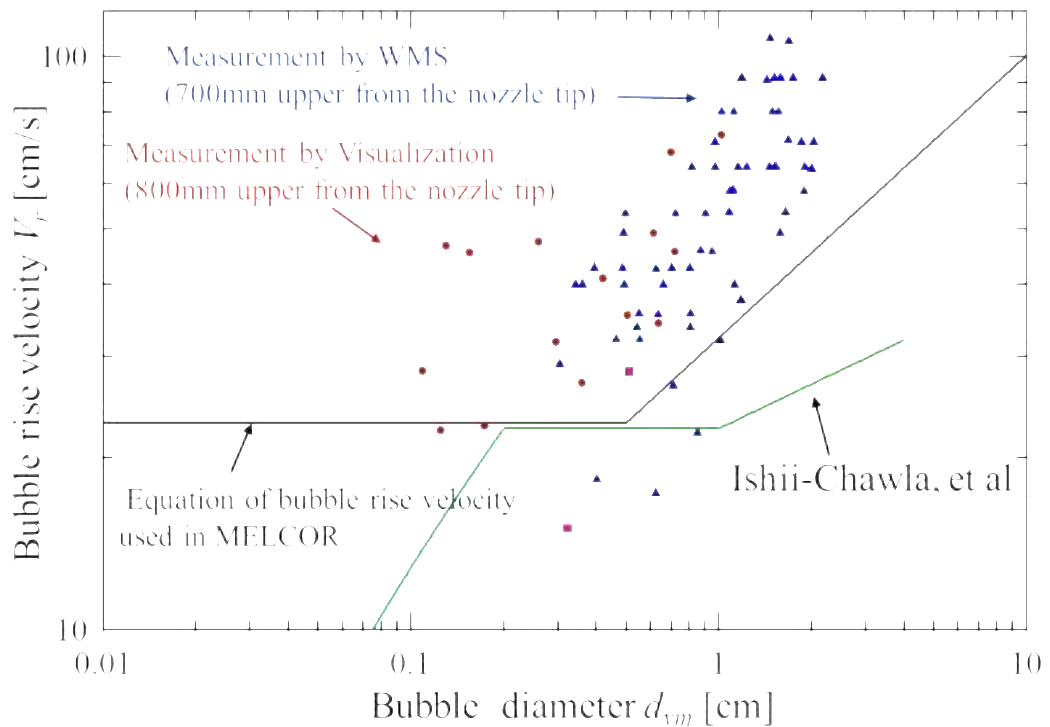


図 3-132 気泡の上昇速度の比較結果

1.2.12 必要とされる計測項目に対しての現状と展望

本研究で目的としているプールスクラビング効果に対しての計測項目は次の通りである．まとめとして項目ごとに計測の現状と今後の展望について順次記載する．

- ・気泡の径，形状及び流速の分布
- ・気泡塊（クラスタ又はプルーム）の平均上昇速度
- ・ボイド率分布
- ・界面積濃度
- ・界面又は液面から発生する液滴の径及び速度の分布
- ・2 相流流動様式の特定制及び合体・分裂挙動の把握のための可視化情報
- ・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）

- ・気泡の径，形状及び流速の分布

WMS より気相噴流中の気泡径分布，気相の上昇速度を取得し，また可視化計測より気泡群中の気泡径分布および気泡の上昇速度を取得した．今後は図 3-133 にしめすような奥行きによる誤差を評価し，可視化計測結果に反映していく必要があり，また WMS のにおいても計測結果の更なる検証が必要であると考え．また流速分布計測のためには画像処理の自動化を図る必要が出てくると考える．

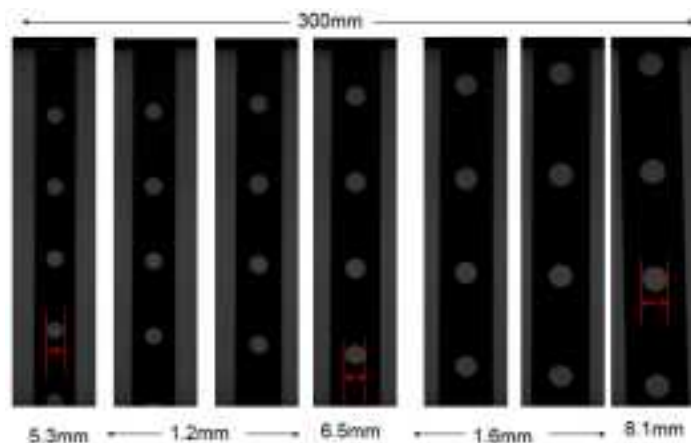


図 3-133 奥行きによる誤差の評価

- ・気泡塊（クラスタ又はプルーム）の平均上昇速度

画像よりピクセル数から気泡塊の移動距離を測定し高速度カメラの撮影速度から気泡塊の上昇速度の算出し，速度を計測する．なお，可視化画像より速度を求める際，面積重心位置を追跡することが困難であるため，気泡の先端位置の移動距離を計測することで速度を算出する方法を考えている．図 3-134 より予備的に気泡塊の上昇速度を算出した結果， 0.97m/s となった．今後ワイヤメッシュセンサによる気泡塊の上昇速度計測や，画像処理の自動化およ

び精度の向上など多方面から検討する必要があると考える

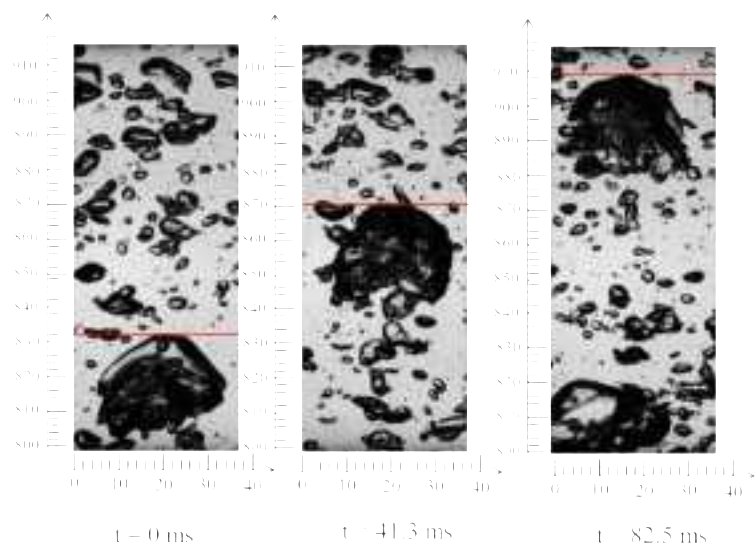


図 3-134 気泡塊の上昇速度の試算

- ・ボイド率分布

本研究としてボイド率分布計測のためワイヤメッシュセンサの仕様検討および設備を行った．設備したワイヤメッシュセンサを用いてボイド率分布の流量依存性およびノズル径依存性を確認した．しかし現状の計測結果の精度に関しては検討の余地があると考える．ノイズの除去，さらなる検証が必要であると考える．また今後の計測項目としてはエアロゾルを含む気相噴流の流動構造把握のため，ワイヤメッシュセンサを使用してエアロゾル有無によるボイド率分布への影響を評価していくことが挙げられる．

- ・界面積濃度

界面積濃度については要開発項目とする．ワイヤメッシュセンサと可視化観測より計測を検討している．

- ・界面又は液面から発生する液滴の径及び速度の分布

LED をバックライトとし，界面又は液面から発生する液滴の撮影高速度カメラを用いて行った．現状の可視化手法では，液滴の飛散速度が高速であり，現象を捉えきれていない．可視化手法の検討として短パルス光源を用いて鮮明な画像を処理することで速度と径を取得することを検討する．またエアロゾルスpektロメーターを用いることで液滴の粒子径分布を取得できるか検討する．図 3-135 に示す結果はエアロゾル計測器を用いて液滴の計測を行った結果であるが，現状の計測結果から計測可能であることは確認できたが，空気中の粒子の分別できておらず，今後の検討課題する．

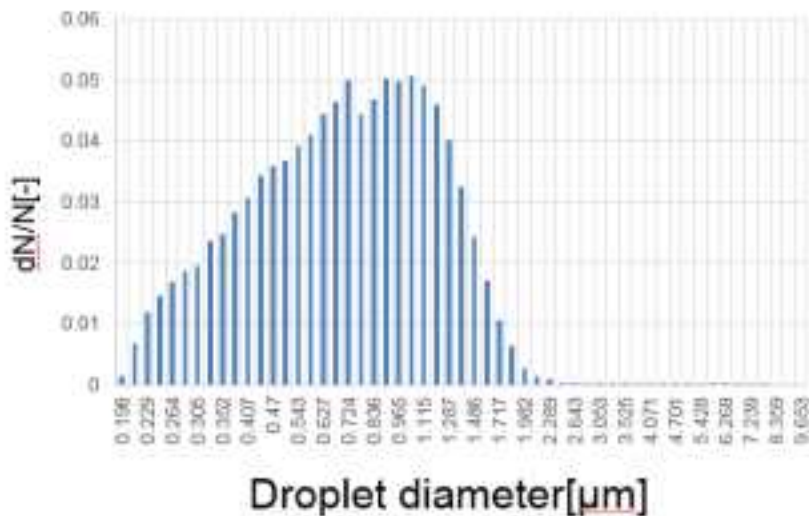


図 3-135 エアロゾル計測器による液滴計測

・2 相流流動様式の特定制及び合体・分裂挙動の把握のための可視化情報

LED および高速度カメラを用いたバックライト法より気泡塊を中心とした追従撮影を行うことで合体・分裂挙動の可視化情報を取得した．また気相噴流全体を可視化することで定性的に流動把握した．また流動様式を特定するため噴流中心軸上のボイド率を高さ毎にプロットすることで，本実験体系においては運動量支配領域と遷移領域が存在することが確認できた．今後は既存研究にて挙げた遷移領域と浮力領域との境界，浮力領域と浴表面領域の境界を取得していく必要があると考える．

・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）

液相内で温度成層化を形成させる場合には，試験容器内に熱電対を設置し液温を計測する．高さ方向の液温温度分布が必要であるため前述したように，高さ方向 200mm ごとに熱電対用のポートを設けている．ポートに熱電対を挿入することで試験部容器内の高さ方向の液温分布を測定する．なお，試験部容器内のポートは 200mm ごとに 14 か所，熱電対を設置可能である（図 3-136）．現状の計測結果として温度成層の実現可能性を含め検討した．計測手順として，高さ方向に熱電対を挿入し，まず水槽下部から 60℃の温水を注入した．その後 5L/min 程度の流量で 20℃程度の冷水をゆっくり注入し，その過程を常に熱電対より高さ毎の液相温度を取得した．その結果を図 3-137 図 3-138 に示す．結果より今回の実験体系において成層下部は 35℃，成層界面は 40℃，成層上部は 55℃程度であり，温度成層を再現できることが確認された．またポリカーボネート製の水槽に断熱材を巻く必要があると考えていたが，ある程度の時間は温度維持できることも確認された．また蒸気を混入させた場合において周囲の液温の温度計測を行った．結果を図 3-139 に示す．蒸気の噴出開始後，すぐに液相温度の上昇が確認された．昇温速度としては 0.52℃/min 程度であった．この結果より実条件においてもベントにより蒸気が噴出され続けると液温が上昇しサブクール度が低くなり蒸気凝縮がされにくくなることが示唆された．

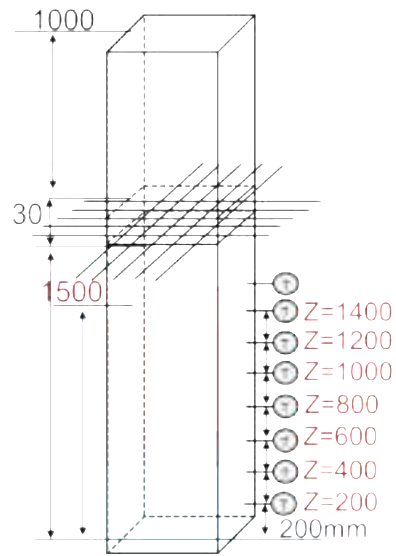


図 3-136 温度成層の形成時の温度計測箇所

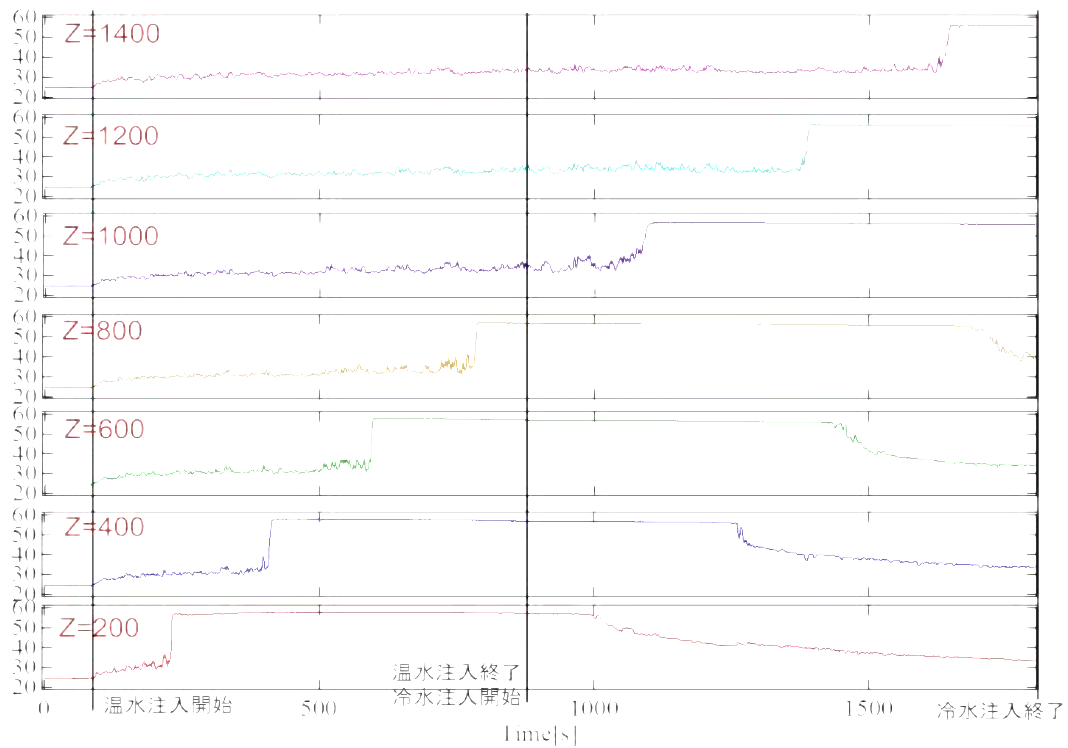


図 3-137 温度成層の形成時の時系列温度変化

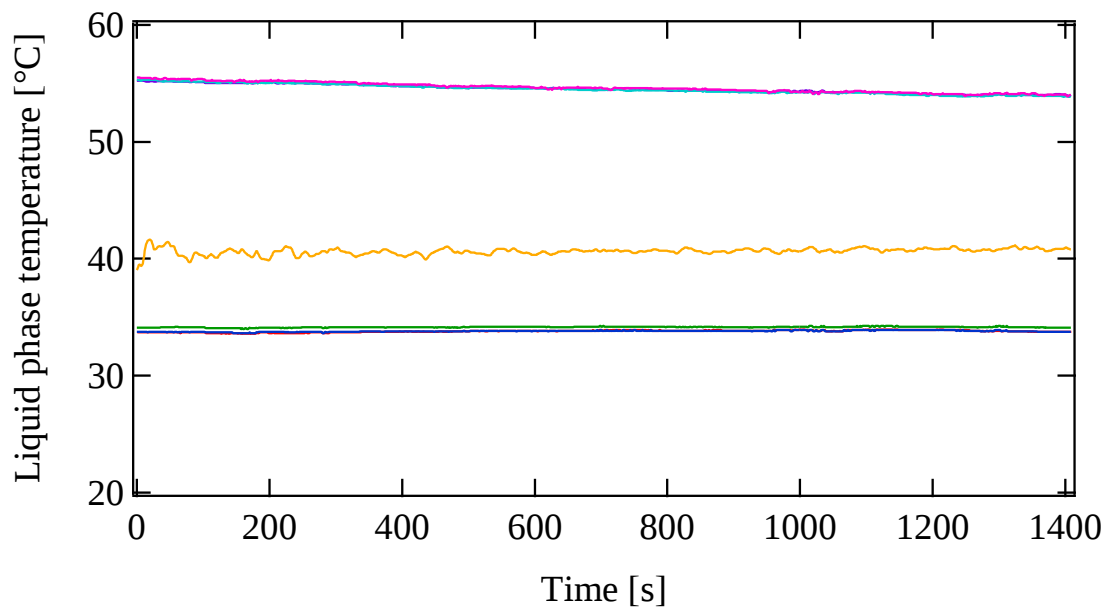


図 3-138 温度成層形成後の時系列温度変化

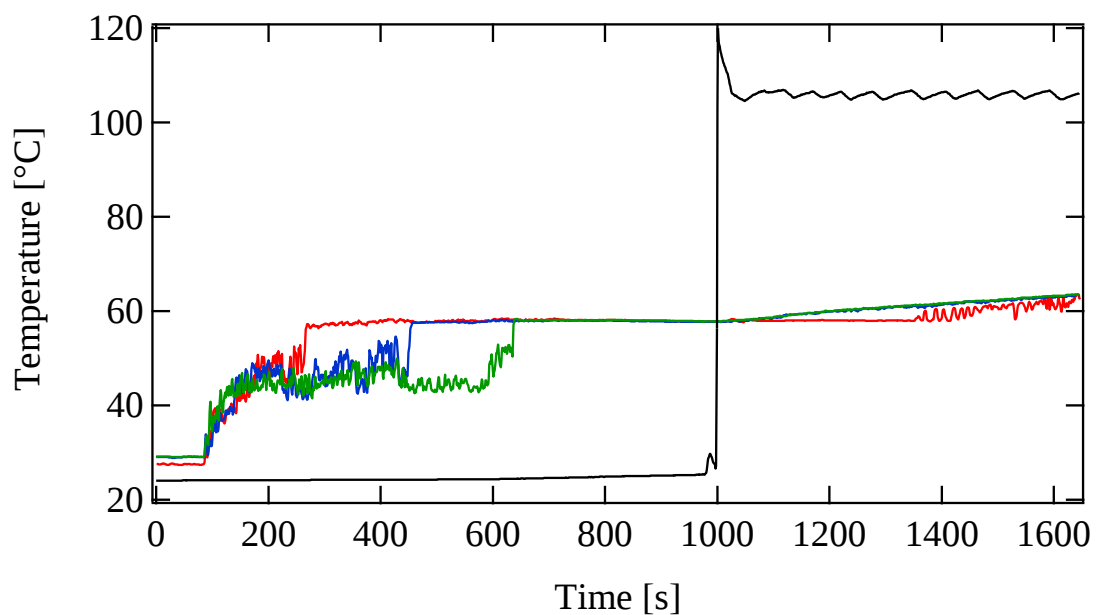


図 3-139 蒸気混入による水槽内の温度上昇

・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）

詳細な温度分布としてはサーモグラフィ（フリースシステムズジャパン社製 **FLIR T420**）を使用して温度成層形成時の水槽の表面温度分布（図 3-140）を取得できるが、実際の液相温度とは異なるため、液相の温度および、水槽内壁の温度を熱電対より計測することで、水槽内の液相温度分布を取得する。方法としては図 3-141 に示す概念を使用する。以下に計算方法を記載する。表面温度を T_1 、 T_2 とすると熱流束 q は以下の式で表される

$$q = k \frac{(T_1 - T_2)}{L} = h_h(T_h - T_1) = h_c(T_2 - T_c) \quad (3.44)$$

T_2 に関しては熱電対およびサーモグラフィで計測し, T_1 に関しては熱電対より計測する.
またグラフホフ数およびプラントル数は以下で表される.

$$Gr = \frac{g\beta(T_w - T_\infty)x^3}{\nu^2} \quad (3.45)$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{C_p\mu}{\lambda} \quad (3.46)$$

自然対流であると仮定すれば局所 Nu 数は以下の式で表される.

$$Nu = \frac{hx}{k} = 0.508 \cdot Gr_x^{\frac{1}{4}} \cdot Pr^{\frac{1}{2}} \cdot (0.952 + Pr)^{-\frac{1}{4}} \quad (3.47)$$

よって T_h は以下の式で表される.

$$T_h = \frac{q}{h_h} + T_1 \quad (3.48)$$

上式より液相温度分布を取得する.

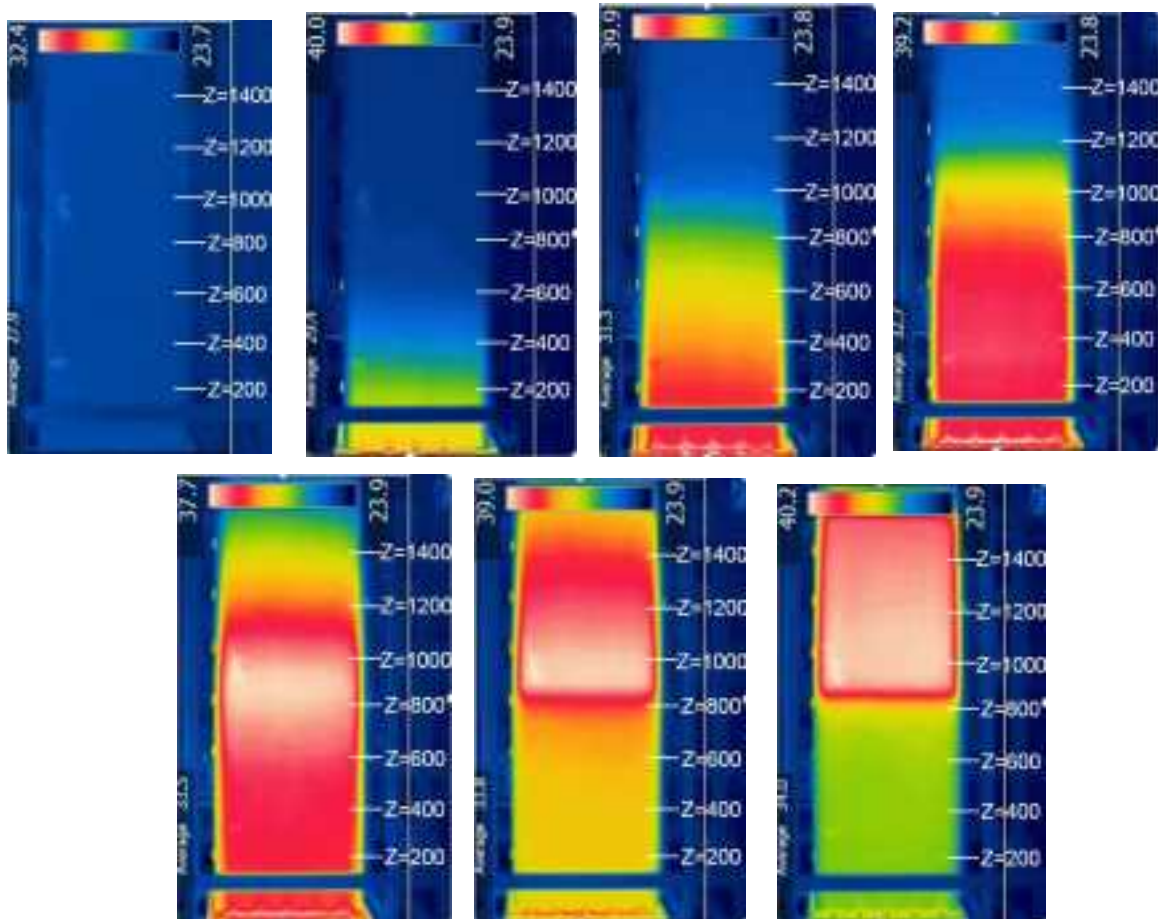


図 3-140 温度成層の実現過程

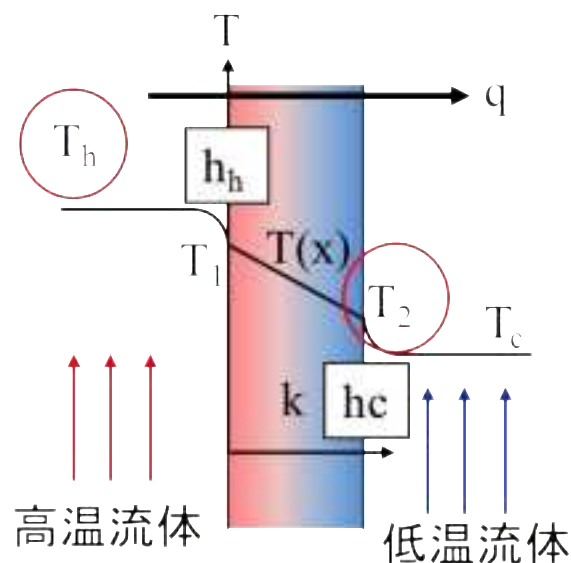


図 3-141 水槽の表面の温度から液相温度の計算エラー! 参照元が見つかりません。

またサーモグラフィより z 軸上の温度分布を計測し、温度成層界面の厚さを取得した。

現状、水槽表面と液相の温度分布が同様の傾向を示すと仮定して計算している。算出は温度成層の下部および上部から標準偏差 2% を超えた際に界面の始まりとした。図 3-142 より結果として温度成層の界面厚さは 163mm 程度という結果になった。この温度成層厚さは、温度成層を形成する際の温水および冷水の注入スピードによって変化すると考えられるため、液相の流量計を導入することで温度成層の再現性を担保しようと考えている。また今後の検討項目として蒸気を混入させた際に温度成層が形成されるかも含め、また形成された場合には、成層厚さを計測することで、事故条件を詳細に模擬する必要があると考える。

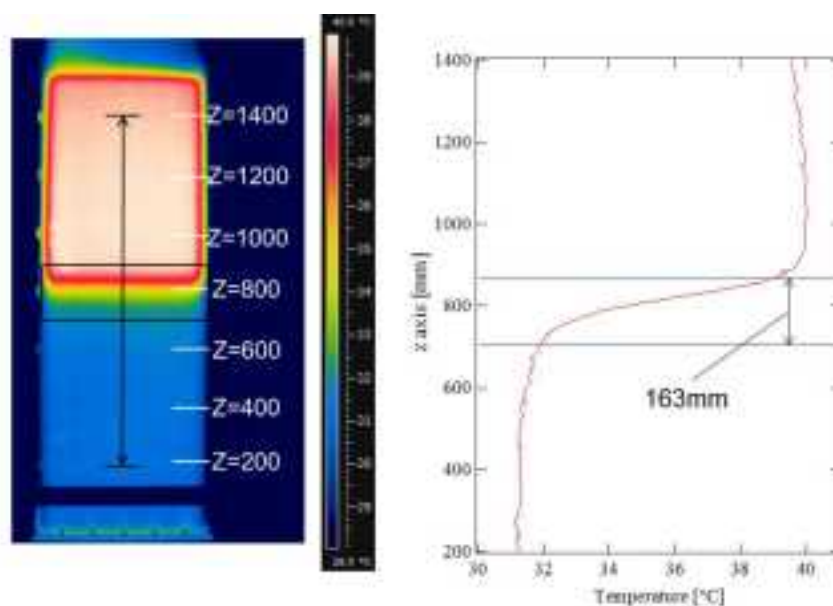


図 3-142 温度成層の成層厚さの評価

1.2.13 まとめ

本研究は、プールスクラビングにおける解析モデルの妥当性確認のため、核分裂生成物の除去効果に大きく関わる気相噴流挙動およびそのエアロゾル挙動の相互関係に関する基礎データの取得を目的として、新たに実験装置を製作し、計測項目に対して適切な実験を実施した。以下の知見を得た。

(1) 気相噴流の流動構造評価

プールスクラビングにおける気相噴流の流動構造として、噴流の高さ方向（ z 方向）が高くなるにつれボイド率分布が半径方向に分散する様子が確認され、流動様式については本実験体系上 $z=300\text{mm}$ を遷移点として $z=100\sim 300\text{mm}$ においては運動量支配領域、 $z=300\sim 900\text{mm}$ においては遷移領域および浮力領域であることが示唆された。運動量支配領域においては気相が連なった流動が確認され、浮力領域においては、大気泡の存在が確認された。気相速度分布に関してはボイド率分布と同様の傾向を示し、その平均値は運動量支配領域において高速で噴出しており、浮力領域においてはほぼ一定の速度を示すことが確認された。速度分布およびボイド率分布はノズル径を変化させてもノズル出口付近を除いてあまり変化しないことが確認された。気泡径分布は前述した流動様式の領域分別とは異なる挙動となり、 $z=100\text{mm}$ を除いて対数正規分布でフィッティングできることが確認され、 $z=100\text{mm}$ においては小気泡と大気泡の 2 つのピークの存在を確認した。この大気泡ピークは気相噴流の上昇に伴い消滅し、小気泡のみのピークのみとなる。気泡径分布の挙動は実験パラメータを変化させると異なることが確認された。気相流量を一定としてノズル径を大きくさせると生成される気泡数が減少することが確認され、またノズル見かけ流速を一定としてノズル径を変化させると $z=100\text{mm}$ において生成される大気泡のピークが大きくなることが確認された。また $z=900\text{mm}$ においては小気泡のヒストグラムのピーク幅が大きくなることが確認された。

(2) 気相噴流中エアロゾル挙動

気相噴流における気相界面の揺らぎによって気相内のエアロゾルが液相に移行する挙動の可視化に成功した。移行する際の瞬時 PIV 結果よりノズル出口付近においては気相の上昇方向に垂直に流れ場が発生し、また気相流量が増加に伴い移行時の速度場が増加し、結果として移行する粒子量も増加することが確認された。ノズル出口付近においては気相流量が大きくなると気相界面の揺らぎが大きくなり、また減速の際の加速度が増加することにより液中移行量が増加したと考えられる。また蒸気を混入させた場合においては気相内の全ての粒子が液相に移行する挙動が観察された。

(3) 解析モデルの比較とその除染評価

・ スウォーム上昇速度の比較

解析モデル式において流量とノズルからの位置のみに依存する計算式であるが、 $Z=100\text{mm}$ を除いて同様の傾向を示していることが確認できる。これは気相噴流の速度が終端速度に達しているためと考える。 $Z=100\text{mm}$ における大きな差異につい

ては解析モデルの適用領域ではない可能性が示唆された。除染評価としては式に記載されているとおり流量が増加すると速度が上昇し、水中での滞留時間が短くなり、DFは減少傾向を示すため、現状の解析モデルは実験値を過大評価していると考えられる。

- ・ 気泡の扁平率の比較

解析モデルに使用されている式が実験値を全体的に過小評価することが確認された。過小評価の原因としては、主に2つ考えられる。解析モデルに使用されている式が、気泡群中の気泡形状を評価したものではなく、単一気泡のみの場合の形状評価したものである可能性である。そのためwellekの実験式と同様の傾向を示すことにも合致する。2つ目はエアロゾルを含む場合には扁平しにくく、球形状かつ剛体球のような挙動に近づくことが報告されているので、解析モデルの式がエアロゾルを含む気泡の形状評価をしているためエアロゾルを含まない場合には過小評価することになったと考えられる。

- ・ 気泡の上昇速度の比較

MELCORで使用されている式とishi-chawlaの実験式は0.2cm~1cmにおいてはほぼ一致することが確認された。しかし1cm以上の範囲においてはMELCORで用いられる計算式のほうがより高速で上昇する評価であることが確認された。除染評価としては式より気泡の上昇速度が増加すると気泡の表面速度が増加し、遠心力の効果が增加するため、気泡界面に向かうエアロゾル粒子の速度が増加するためDFとしては増加する傾向を示すため、解析モデルにおいては実験値を過小評価することが考えられる。

1.3 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、プールのスクラビング効果による DF 評価を実施し、結果の分析する。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 3-5 で明示した。H28 年度は粒子径の影響について検討を実施した。

1.3.1 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 3-143 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。

$$DF_{OV,part} = \frac{\sum_{i=1}^{NBINS} \dot{m}_{part,i}}{\sum_{i=1}^{NBINS} \left(\frac{\dot{m}_{part,i}}{DF_{OV,i}} \right)} \quad (3.9)$$

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 1.3.2 および 1.3.3 にて後述する。

$$DF_{OV,i} = DF_{EC} \times DF_{II,i} \times DF_{ER,i} \times DF_{SR,i} \quad (3.10)$$

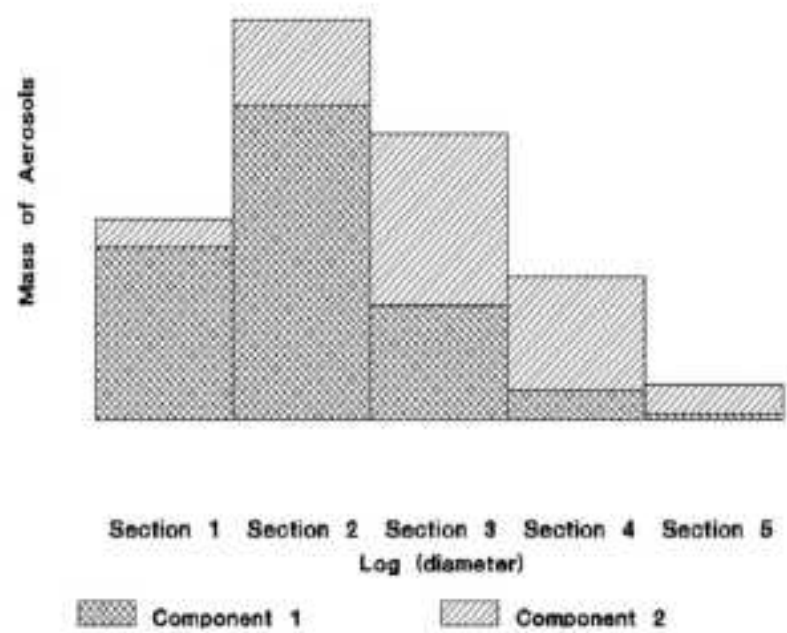


図 3-143 エアロゾルの質量分布 [1]

1.3.2 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 3-144 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，まずグロービュールを形成する．このグロービュール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 3-145 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．

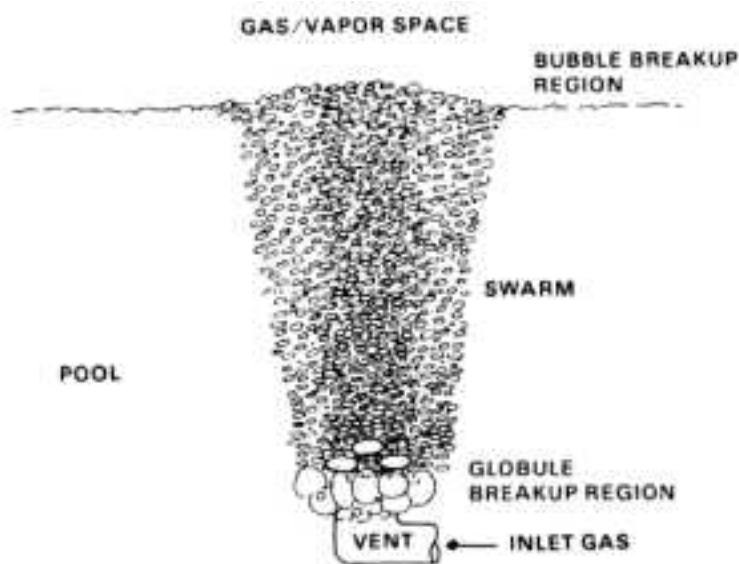


図 3-144 SPARC-90 における流動モデル

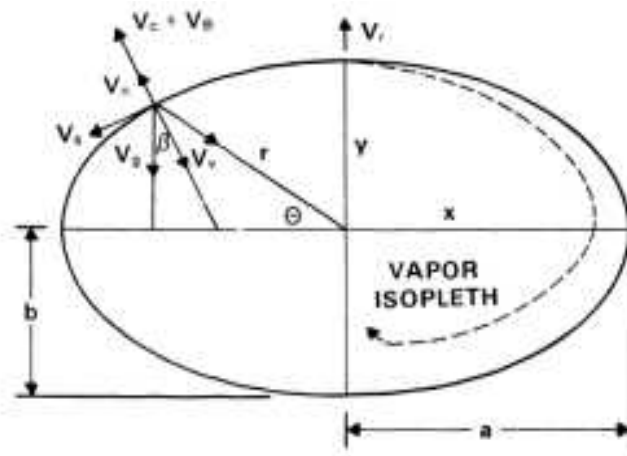


図 3-145 SPARC-90 における気泡モデル

1.3.3 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 3-146 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。

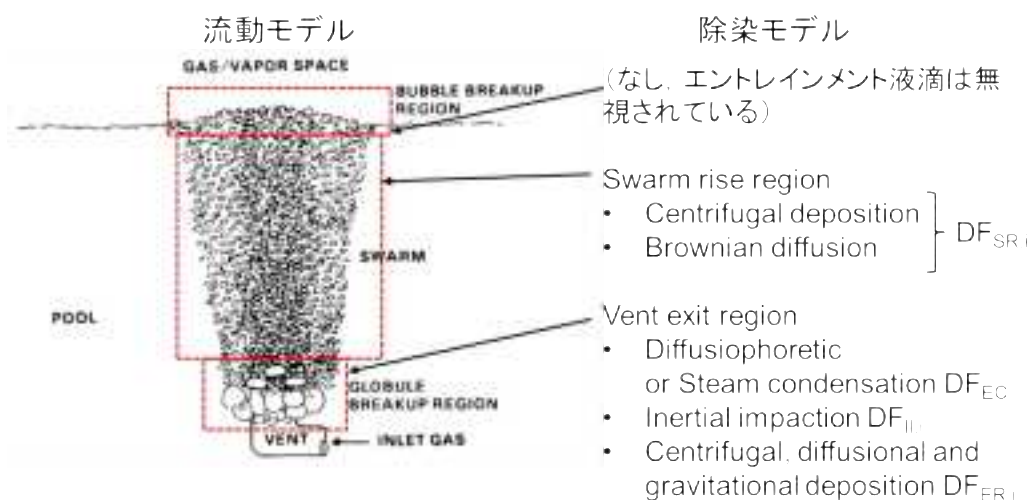


図 3-146 SPARC-90 における除染モデル

1.3.4 解析体系および解析条件

図 3-147 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を図 3-148 に示す．プール部の詳細な条件や流動条件は表 3-5 に示す．エアロゾルに関する入力値は図 3-148 に示す．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，本試験部の形状寸法を想定している．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 320mm とした．試験流体は水および空気とし，タンク部は常温，3 気圧とし，プール部および環境内の温度，圧力は常温，常圧とした．ノズル部の流速は 1 m/s で一定とした．タンク部からプール部の初期圧力差は 200 kPa であり，この圧力差により駆動される流速も期待される．しかし，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 0.0W 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．いずれも条件も質量の区分は 1 とした．例えば，エアロゾル径 0.1~0.2 の時，0.1 と 0.2 の 2 区に分けた．

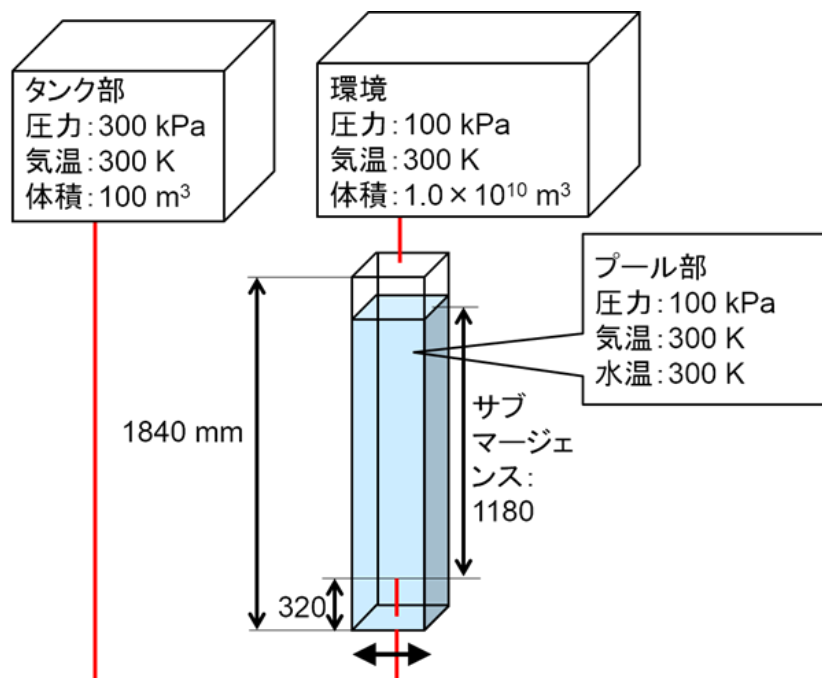


図 3-147 解析体系

各ボリューム主要パラメータ				
	体積 [m ³]	圧力 [kPa]	気温 [K]	水温 [K]
タンク部	100	300	300	-
プール部	0.166	100	300	300
環境	1.0×10^{10}	100	300	-

図 3-148 解析体系の主要なパラメータの入力値

	核種	粒径 [μm]
No. 1	Cs	0.1 ~ 0.2
No. 2	Cs	1.0 ~ 2.0
No. 3	Cs	10 ~ 20
No. 4	Cs	0.4 ~ 0.8
No. 5	Cs	4.0 ~ 8.0

図 3-149 エアロゾルの入力値

表 3-5 解析条件

番号	検証内容	試験流体	ノズル直径	ノズル部流速	体積流量	サブマージエンス	計算時間	環境の体積	プール上部の体積	CV節点数	粒子径	温度	断面積
			[mm]	[m/s]	[L/min]	[mm]	[s]	[m ³]	[m ³]		[μm]	[K]	[m ²]
No. 1	エアロゾル粒子径の影響	空気-水	3	1	0.424	900	86400	10 ¹⁰	0.0558	1	1.0-2.0	300	0.09
No. 2	エアロゾル粒子径の影響	空気-水	3	1	0.424	900	86400	10	0.0558	1	0.1-0.2	300	0.09
No. 3	エアロゾル粒子径の影響	空気-水	3	1	0.424	900	86400	10	0.0558	1	10-20	300	0.09
No. 4	エアロゾル粒子径の影響	空気-水	3	1	0.424	900	86400	10	0.0558	1	0.4-0.8	300	0.09
No. 5	エアロゾル粒子径の影響	空気-水	3	1	0.424	900	86400	10	0.0558	1	4.0-8.0	300	0.09

1.3.5 体系内の流況の時間変化例

まず、図 3-150 から図 3-152 に、各ボリュームの圧力、温度、ボイド率の時間変化例を示す。これらの結果は表 3-5 の No.1 のものである。グラフ中の実線のうち、タンク部は青色、プール部は赤色、環境は緑色である。なお、プール部の水中とガス中は同じ圧力と温度であり、一つの値が出力される。

圧力は、タンク部が時間経過につれ微減するが、プール部と環境は変化しない。これは、タンク部からガスが放出されることでタンク部内の圧力が減少しており、プール部はガスが溜まることなく通過し、環境では、体積が非常に大きいことから、ガスが流入しても圧力に顕著な変化は現れないと考えられる。

温度は、時間経過につれタンク部およびプール部では低下し、環境では変化しなかった。これは、タンク内が減圧されたことで温度が低下したと考えられる。また、プール部では、タンクから温度が下がったガスが流入することで冷却されたと考えられる。環境は、冷やされたガスが流入したとしても、体積が非常に大きいいため顕著な変化として現れないと考えられる。

ボイド率については、液相が存在するプール部ではその液相割合分だけの値が得られており、それ以外で値の変化はない。取り扱う流体が空気であるため、特にガスの凝縮による液相の増加なども起こりえないため、妥当な結果であると考えられる。

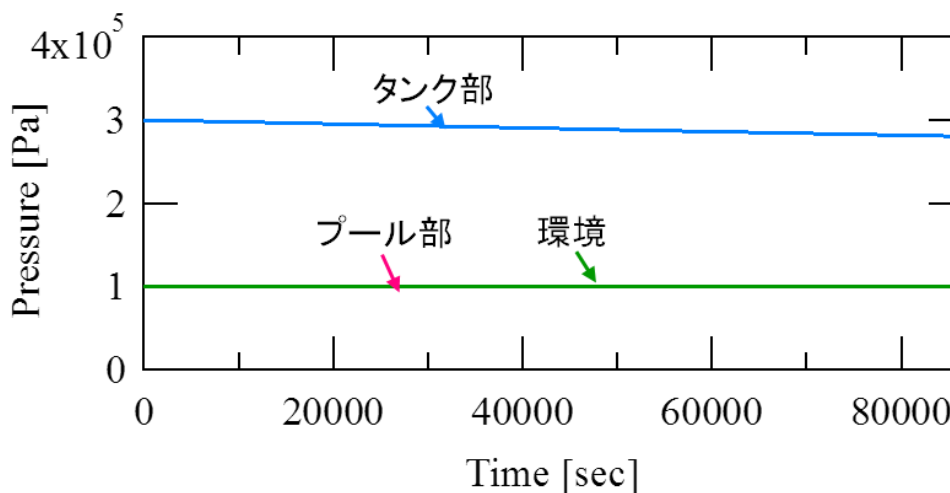


図 3-150 各ボリュームの圧力

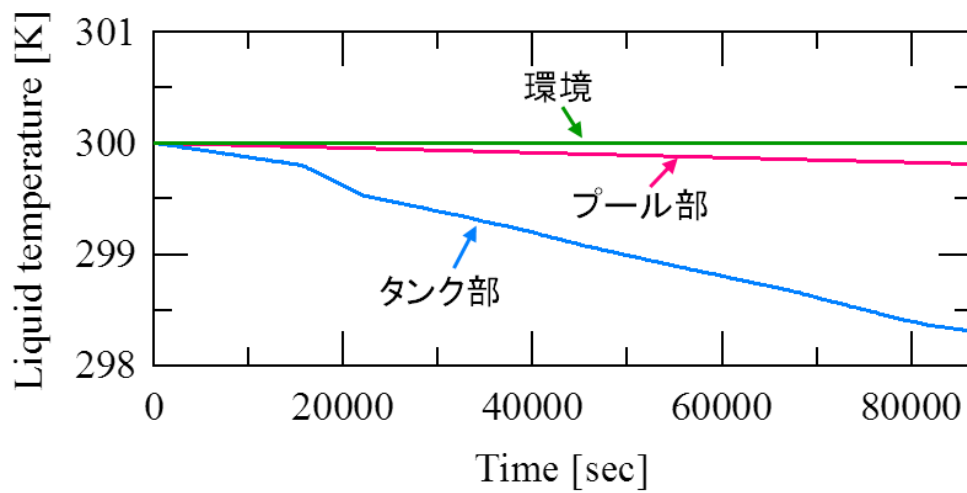


図 3-151 各ボリュームの温度

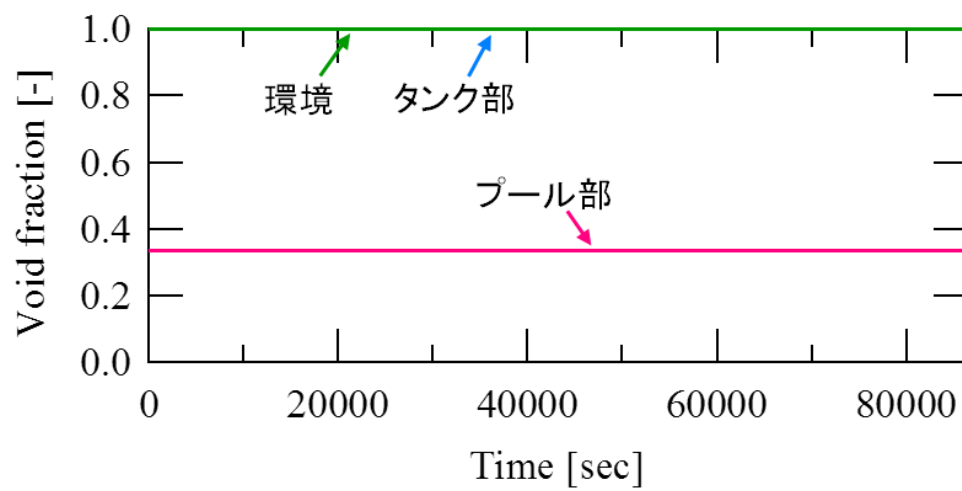


図 3-152 各ボリュームのボイド率

1.3.6 体系内のエアロゾル輸送の時間変化

まず、図 3-153 から図 3-155 に、プール部水中、プール部ガス中、環境中に存在するエアロゾル質量の時間変化を示す。グラフ中の実線のうち、0.1-0.2 μm は水色、0.4-0.8 μm は赤色、1.0-2.0 μm は緑色、4.0-8.0 μm は橙色、10-20 μm は紺色である。

プール部水中へ捕集されたエアロゾルは、時間経過に伴い線形に増加する様子が見て取れる。いずれの粒径でもその傾向は変わらないが、0.4-0.8 μm と 1.0-2.0 μm は捕集量が他と比較して少ない。プール部水中を通過したエアロゾルはガス中へ移動する。ガス中で残存するエアロゾル質量は、いずれの粒径においても時間が 1000 s に達するころには増加しなくなり平衡に至ったと考えられる。また、0.4-0.8 μm と 1.0-2.0 μm が比較的多く残存しやすい傾向にあることがわかる。環境中へ放出されたエアロゾルは、いずれの粒径においても線形に増加する傾向にあった。0.4-0.8 μm と 1.0-2.0 μm は他と比較して多くの質量が環境へ放出されている。プール部ガス中でも同様の傾向がみられている。これらの粒径はプール部水中で捕集されたエアロゾル質量が少なく、その分だけプール部ガス中および環境中での量が多くなっていると考えられる。

図 3-156 から図 3-158 に、タンク部からプール部水中へ、プール部水中からガス中へ、プール部ガス中から環境への質量流量を示す。なお、質量流量は移動平均した値を使用した。タンク部からプール部水中への質量流量は、線形に低下する傾向にあり、どの粒径でも違いが見られなかった。プール部水中からガス中への質量流量は、1000 s 頃までに落ち着き、以降は徐々に減少する傾向にあった。0.4-0.8 μm と 1.0-2.0 μm は他と比較して値が大きい。プール部では捕集されず、ガス中へ放出される量が多いことが考えられ、図 3-153 および図 3-154 に見られた傾向と一致した。プール部ガス中から環境中へ放出されたエアロゾル質量流量は、1000 s 頃までに急激に上昇し、以降は落ち着き、徐々に減少する傾向にあった。プール部水中からガス中で見られた質量流量のオーダーと同程度であり、ガス中へ流入した量がそのまま環境中へ放出されることが考えられる。これは、図 3-154 のガス中に残存するエアロゾル量は時間が経過してもほぼ一定値であり、図 3-155 の環境中へ放出されたエアロゾル量が増加したことと一致する。

一方で、環境中でのエアロゾル量が増加し続けるのに対し、プール部ガス中のエアロゾル量は増加していない。感覚的には、プール部ガス中のエアロゾル量も増加すると考えられるが、解析結果は異なる。この点に関して図 3-150 の圧力から考察する。プール部と環境の圧力は一致している。このことから、プール部へ流入したエアロゾルを含むガスは、圧力損失を受けていないと考えられる。現実にはプール部ガス中でエアロゾルが残存する際、エアロゾルが壁面へ付着することや気流から離脱し重量沈降すること、プール水槽から環境へ続く流路が急縮小形状であれば渦が発生しそこに取り込まれることが考えられる。いずれの場合でも圧力損失は発生すると予想されるが、解析結果では見られない。このことから、解析コード上でこれらの現象が考慮されていないか、確認できるほど顕著なものではない可能性が考えられる。この検証のためには、今後解析コードの検証が必要である。

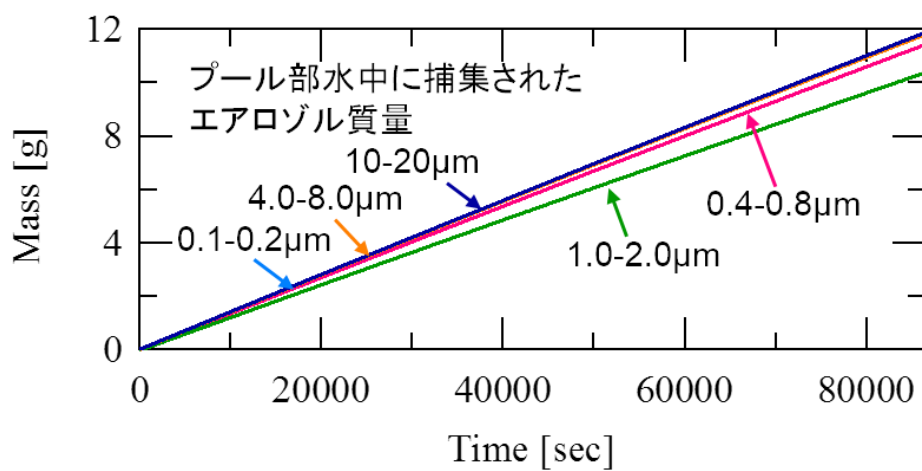


図 3-153 プール部水中に捕集されたエアロゾル質量

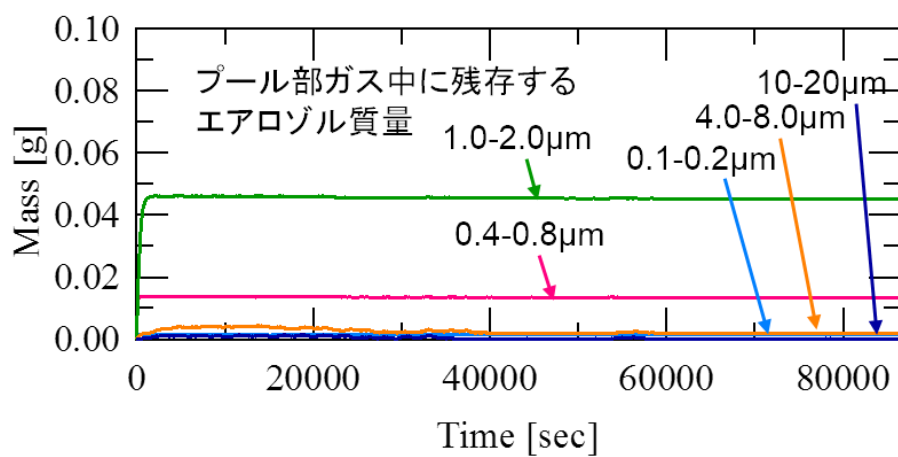


図 3-154 プール部ガス中に残存するエアロゾル質量

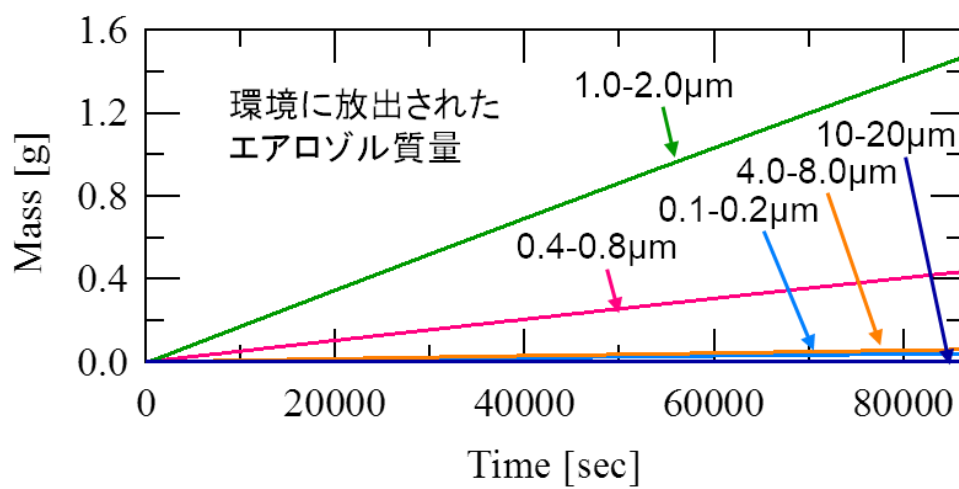


図 3-155 環境に放出されたエアロゾル質量

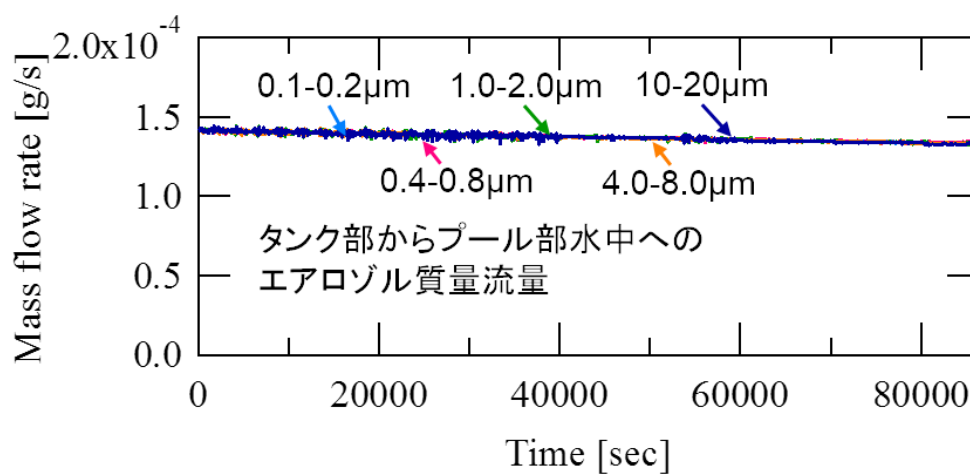


図 3-156 タンク部からプール部水中へのエアロゾル質量流量

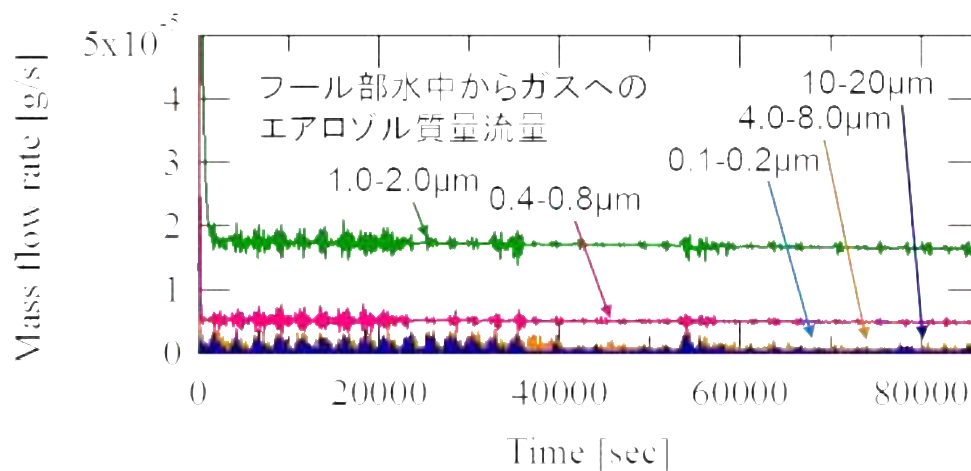


図 3-157 プール部水中からガスへのエアロゾル質量流量

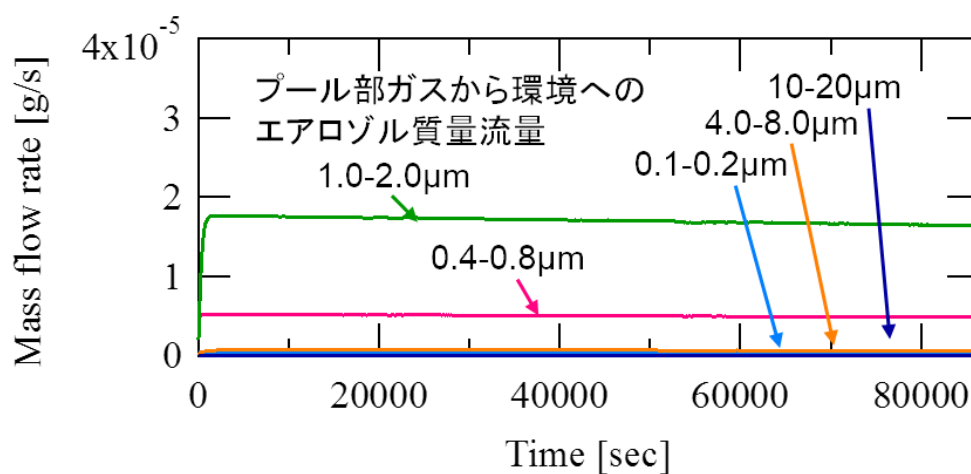


図 3-158 プール部ガスから環境へのエアロゾル質量流量

1.3.7 DF に対する粒子径の影響

図 3-159 と図 3-160 にエアロゾル質量流量から求めたプール部液中における除染係数の時系列データと MELCOR から出力された除染係数の時系列データを示す。図 3-161 と図 3-162 には、それぞれの除染係数を確立密度分布のヒストグラムで示す。図 3-163 と図 3-164 には、それぞれの除染係数とエアロゾル粒径の関係を示す。0.1-0.2 μm は水色、0.4-0.8 μm は赤色、1.0-2.0 μm は緑色、4.0-8.0 μm は橙色、10-20 μm は紺色である。なお、質量流量から除染係数を求める際は、移動平均した質量流量の値を使用した。

エアロゾル質量流量から求めた除染係数では、0.1-0.2 μm は 23 程度、0.4-0.8 μm は 10 程度、1.0-2.0 μm は 12 程度でほぼ一定値であった。4.0-8.0 μm は 10 から 10^4 程度の範囲をばらつきながら推移した。10-20 μm も同程度の範囲をばらついていたが、38,000 s を経過した辺りから 10^{11} 辺りの値が見られるようになった。

一方で、MELCOR から出力された除染係数では、0.1-0.2 μm 、0.4-0.8 μm および 1.0-2.0 μm は 1 程度であり、4.0-8.0 μm は 10^2 程度で一定値を取った。10-20 μm は 10^{12} で一定に推移した。

除染係数の求め方によって、値が異なり、また一定値であったりばらついたりした。これらの特性はヒストグラムの結果からも確認できた。続いて、除染係数とエアロゾル粒径の関係について検討する。図 3-163 と図 3-164 は、ヒストグラムの最頻値をプロットし、ヒストグラムの標準偏差をエラーバーで示した。10-20 μm に関しては、ヒストグラムが二つに分かれたため、それぞれの山についてプロットした。エアロゾル質量流量から求めた除染係数は、サブミクロンから 1 μm にかけて低下し、1 μm 以上になると増加した。10-20 μm では 10^2 と 10^{11} まで増加した。MELCOR で求めた除染係数では、粒子径が増加するにつれて除染係数も増加した。10-20 μm では 10^{12} まで増加した。どちらの除染係数についても、1 μm 以上の範囲で粒径の増加に伴い除染係数が増加する傾向は一致した。1 μm 以下では除染係数のオーダーや増減の傾向が異なる結果となった。このことから、プールスクラビングによって 1 μm 以上の範囲では粒径の増加に伴い除染係数が向上する可能性と、10 μm に近づくと 10^{12} とほぼ完全にエアロゾルは除去される可能性が得られた。

二つの除染係数の求め方で、異なる結果となった点について考察する。エアロゾル質量流量から求めた除染係数は粒径 1 μm 以下で 10^1 から 10^3 の値が得られているが、MELCOR から出力された除染係数では 10^0 となった。これらのことから次のことが考えられる。一つは、MELCOR からデフォルトで出力される除染係数の計算上、サブミクロンのエアロゾルはプールで捕集されず、そのまま環境中へ放出されている可能性がある。もう一つは、質量流量から求めた除染係数に関して、何らかの要因によりプール部水中から気中へ放出される質量流量が減少した可能性が考えられる。ここで、MELCOR ではエアロゾルの凝集や成長が計算されている点を挙げる。このことから、エアロゾルが凝集または成長し、元々用意していた粒径の区分を逸脱したことで、結果的に元の粒径範囲のエアロゾル質量流量が減少し、除染係数が 10^1 や 10^3 の値を取ったと考えられる。現段階ではどちらの除染係数評価手法がより正しいか、またどのような要因で二つの手法の計算結果に違いがでたのか、原因を特定することは難しい。一方で、MELCOR においてサブミクロンエアロゾルの除染に効果的な除染物理現象は、どのようなものが考慮されているか、また、凝集や成長したエアロゾルは区分上でど

のように扱われているかを，調査・検討する必要性を見出すことができた．今後，これらの点を調査・検討することで，MELCOR のエアロゾルの取扱いの詳細を明らかにし，より最適な評価手法を得られることが期待される．

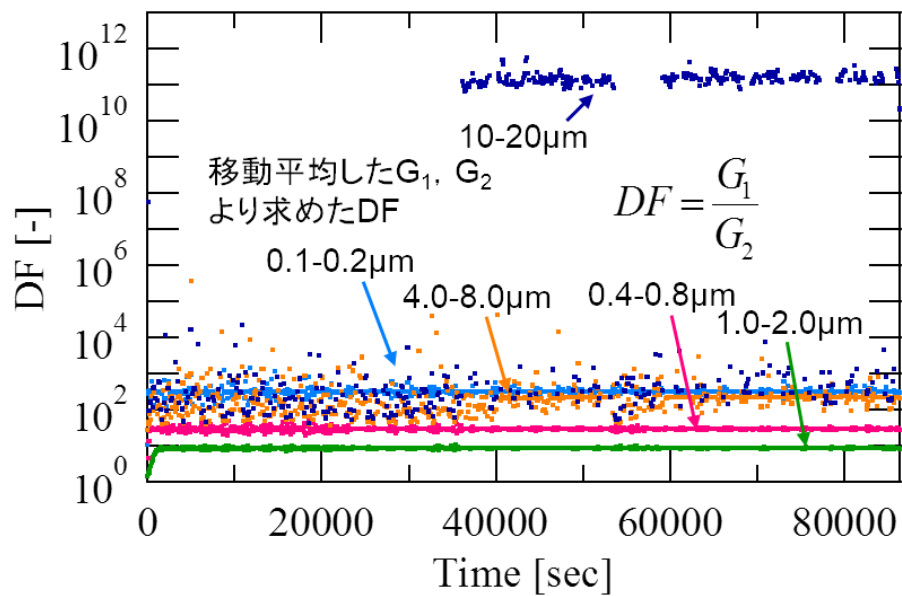


図 3-159 エアロゾル質量流量から求めた除染係数

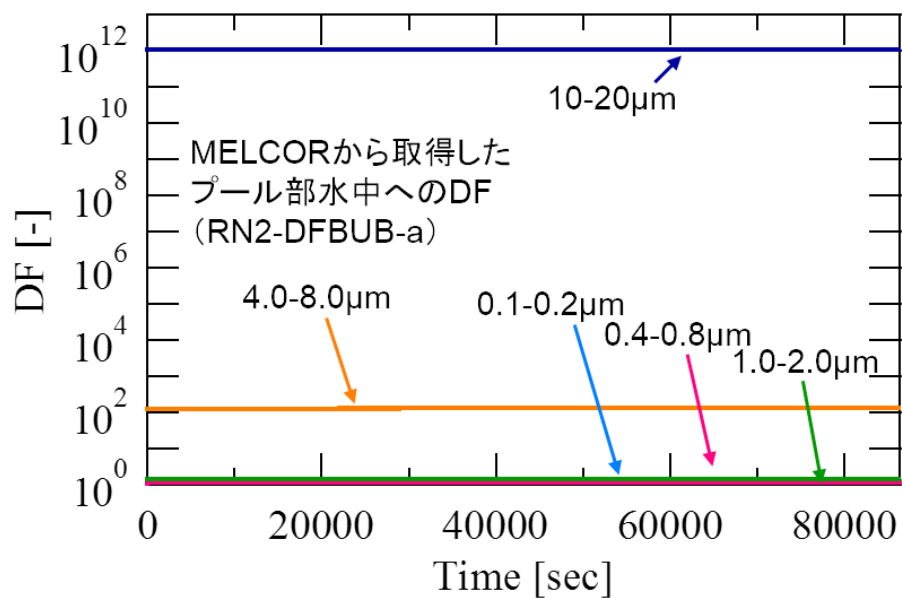


図 3-160 MELCOR から出力された除染係数

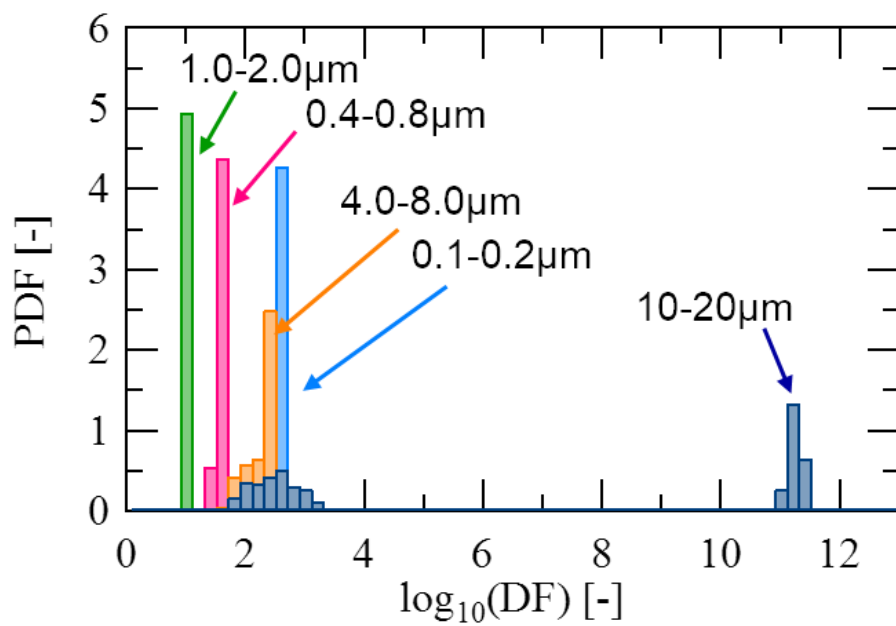


図 3-161 エアロゾル質量流量から求めた除染係数のヒストグラム

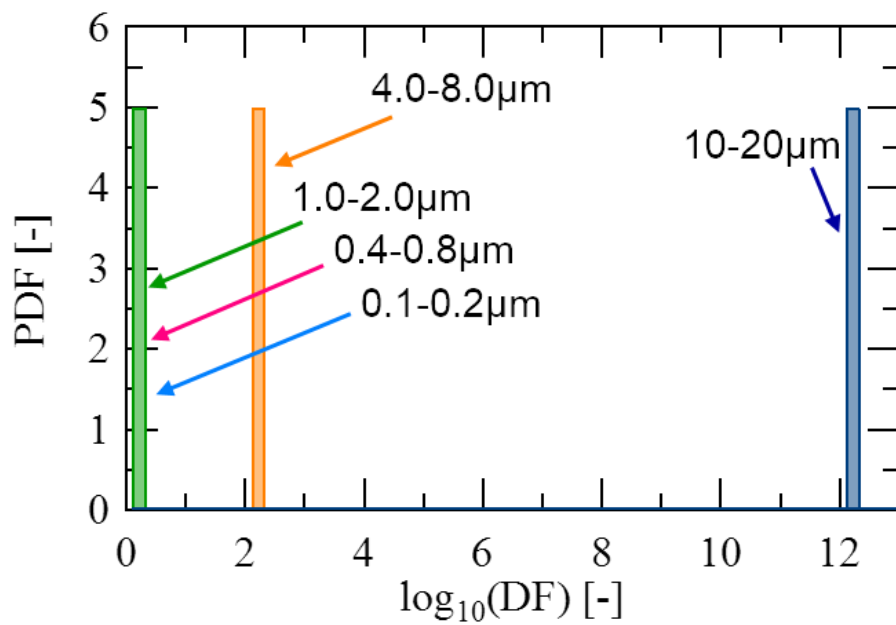


図 3-162 MELCOR から出力された除染係数のヒストグラム

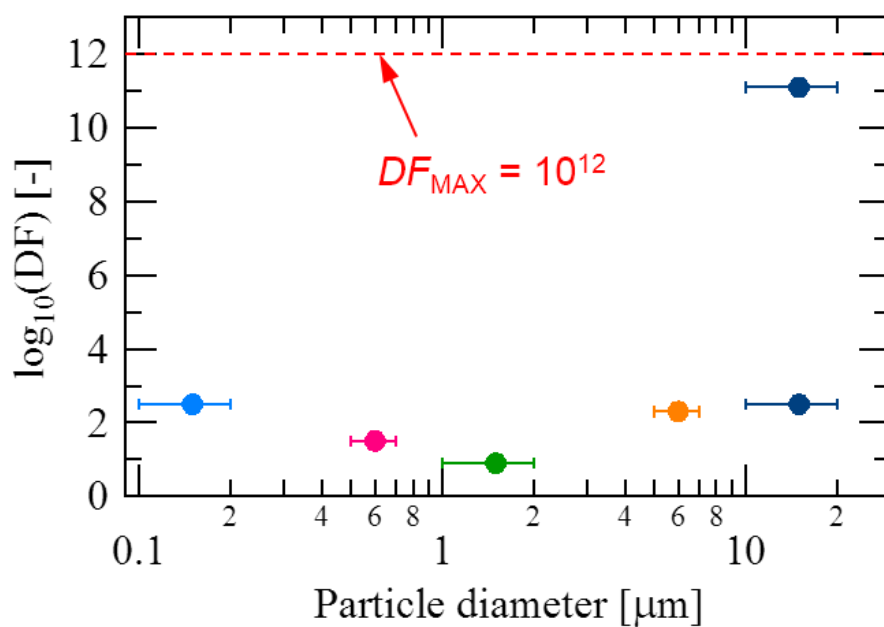


図 3-163 エアロゾル質量流量から求めた除染係数と粒径の関係

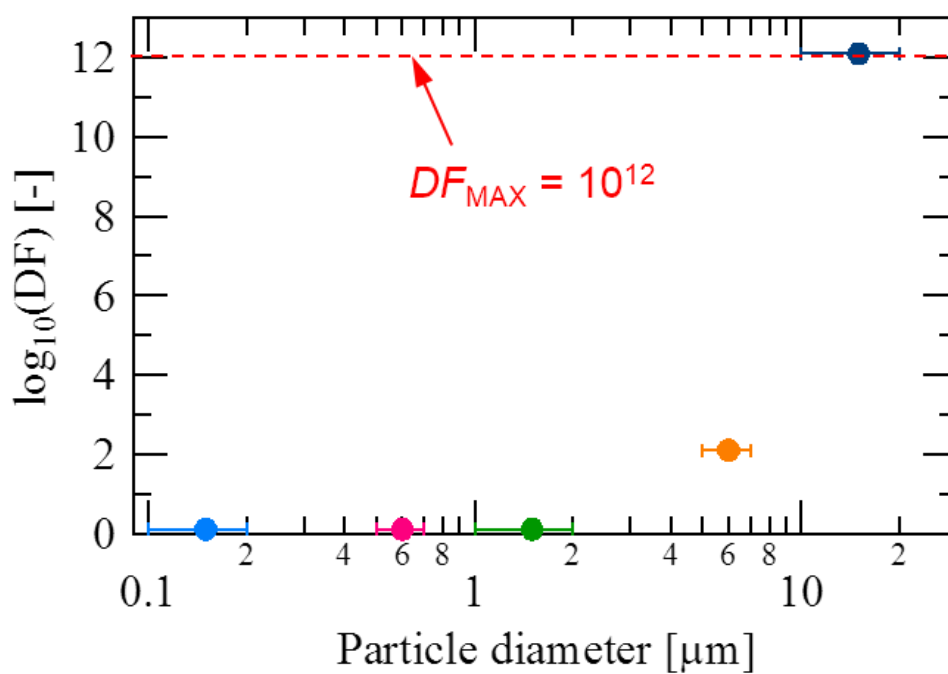


図 3-164 MELCOR から出力された除染係数と粒径の関係

1.3.8 本項のまとめ

MELCOR を用いた解析を実施し、以下の知見を得た。

- エアロゾルの粒径をパラメータとして除染係数を評価した結果、粒径に依存して除染係数は異なることを確認した。またプールスクラビングではエアロゾル粒径が $1\text{ }\mu\text{m}$ 以上の範囲で、粒径の増加に伴い除染係数が向上する傾向があり、 $10\text{ }\mu\text{m}$ に近づくとほぼ完全に除去される可能性が得られた。
- エアロゾルの質量流量から求めた除染係数と MELCOR から出力される除染係数を比較し、得られる値に違いがあることを確認した。特に、サブミクロンのエアロゾルに対し、エアロゾル粒径の増加に伴い得られる除染係数の傾向は異なることを明らかにした。この原因に、エアロゾルの凝集や成長の計算による影響の可能性を挙げ、今後の展望を得た。

文献目録

本研究において使用した文書

- [1] Hashimoto, K. K. Soda and S. Uno. "High Pressure Pool Scrubbing Experiment for a PWR Severe Accident." *Proceedings of the International Topical Meeting on SAFETY OF THERMAL REACTORS*, (1991).
- [2] 五井隆旭”プールスクラビングにおける上昇気泡中のエアロゾル挙動,”筑波大学修士論文 (2015).
- [3] Gauntt, R. O. et al. "MELCOR computer code manuals," *Sandia National Laboratories*, NUREG/CR 6119 (2000).
- [4] Thomson, M. and Melville, L. "Theoretical hydrodynamics," *Courier Corporation* (1968), PP 555-.
- [5] Wright, A. L. J. H. Wilson and P. C. Arwood. "Summary of aerosol code-comparison results for LWR aerosol containment tests LA1, LA2, and LA3," No. NUREG/CP-0082-VOL. **6** (1987).
- [6] Clift, R. John R. Grace, and Martin E. Weber. "Bubbles, drops, and particles". *Courier Corporation* (2005).
- [7] 田川義之ら "界面活性剤溶液中を 3 次元運動する単一気泡の挙動: 第 1 報, 活性剤濃度と 3 次元軌跡の関係 (流体工学, 流体機械)," *日本機械学会論文集. B 編* **76** (771) (2010), 1785-.
- [8] Tomiyama, A., et al. "Terminal velocity of single bubbles in surface tension force dominant regime." *International Journal of Multiphase Flow* VOL. **28** (9) (2002), 1497-.