

平成 29 年度原子力規制庁委託成果報告書

スクラビング個別効果試験に関する研究  
(平成 29 年度分)

筑波大学  
平成 30 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. 業務委託の目的 .....	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測定実験 .....	3
3.1.1. 実験装置の改造及び実験実施 .....	3
3.1.2. 実験データの整理 .....	3
3.1.3. 本項目で着目する MELCOR モデル .....	7
3.1.4. 単一気泡実験装置の概要 .....	11
3.1.6. 本年度行なった単一気泡エアロゾル挙動実験における装置の改造 .....	14
3.1.7. 薄型水槽実験装置の概要 .....	15
3.1.8. Mach-Zehnder 干渉計の概要 .....	16
3.1.9. 計測項目 .....	19
3.1.10. 単一気泡実験において使用したエアロゾル粒子の物性 .....	19
3.1.11. 単一気泡実験にて使用する流体の物性 .....	19
3.1.12. 単一気泡実験における実験条件 .....	20
3.1.13. PIV 処理手法 .....	22
3.1.14. 単一気泡挙動可視化実験 .....	23
3.1.14.1. 単一気泡上昇挙動の可視化計測 .....	23
3.1.14.2. 各エアロゾル条件におけるアスペクト比 .....	27
3.1.14.3. 各エアロゾル条件における上昇速度 .....	31
3.1.15. 単一気泡計測における局所離脱速度の計算 .....	34
3.1.16. 気泡中エアロゾル離脱挙動可視化実験 .....	39
3.1.17. 気泡内部流動可視化実験 .....	42
3.1.18. 油滴を用いた内部流動可視化実験 .....	46
3.1.19. Mach-Zehnder 干渉計を用いた実験 .....	57
3.1.20. 単一気泡実験のまとめ .....	59
3.2. 気泡の二相流挙動評価実験装置の設計製作及び実験実施 .....	62
3.2.1. エアロゾルを用いない際の二相流実験装置 .....	65
3.2.1.1. 本年度行った二相流実験装置における装置の改造 .....	66
3.2.1.2. 二相流試験水槽 .....	67
3.2.1.3. 気相供給系および蒸気供給系 .....	68
3.2.1.4. 給排水系 .....	68
3.2.1.5. ワイヤメッシュセンサ .....	68
3.2.1.6. エアロゾル計測器 .....	71

3.2.2.	流動可視化 .....	75
3.2.2.1.	ボイド率計測 .....	76
3.2.2.2.	気相上昇速度計測 .....	76
3.2.2.3.	温度成層の形成および計測 .....	77
3.2.3.	気相噴流挙動 .....	79
3.2.3.1.	高速度カメラによる流動可視化 .....	79
3.2.3.2.	ワイヤメッシュセンサによるボイド率計測 .....	84
3.2.3.3.	ワイヤメッシュセンサによる気相上昇速度計測 .....	88
3.2.3.4.	噴流中の気泡径分布計測 .....	91
3.2.3.5.	温度成層の形成および計測 .....	94
3.2.4.	ノズル先端における大気泡形成 .....	98
3.2.4.1.	ノズル先端での大気泡形成挙動 .....	98
3.2.4.2.	低流量条件下での気相流量およびノズル径に対する大気泡径計測 .....	98
3.2.4.3.	中高流量条件下での気相流量に対する大気泡径計測 .....	101
3.2.5.	蒸気を用いた噴流実験 .....	102
3.2.5.1.	冷水中での蒸気挙動 .....	102
3.2.5.2.	温水中の蒸気挙動 .....	105
3.2.5.3.	ノズル出口領域における蒸気-空気混合気相噴流の可視化 .....	108
3.2.5.4.	下流における蒸気-空気混合気相噴流計測 .....	110
3.2.6.	MELCOR モデルとの比較 .....	111
3.2.6.1.	気泡径に対するアスペクト比の比較 .....	111
3.2.6.2.	大気泡径に関するモデルと計測結果の比較 .....	112
3.2.6.3.	大気泡の分裂領域の推定 .....	116
3.2.7.	エアロゾルを含まない二相流挙動に関するまとめ .....	120
3.2.8.	エアロゾルを用いた際の二相流実験装置 .....	121
3.2.9.	使用したエアロゾル粒子 .....	122
3.2.10.	ボイド率, 気相速度分布の評価 .....	123
3.2.11.	流動構造の二次元評価 .....	125
3.2.12.	エアロゾル濃度による影響 .....	128
3.2.13.	エアロゾル粒子による噴流への影響 .....	130
3.2.14.	中心ボイド率, 気相速度とノズル距離の関係 .....	133
3.2.15.	ノズル中央の気相速度率-ノズル距離の関係 .....	134
3.2.16.	スウォーム上昇速度評価 .....	135
3.2.17.	画像処理による気泡径分布評価 .....	137
3.2.18.	WMS による気泡径分布評価 .....	140
3.2.19.	気泡形状計測実験装置 .....	141



3.2.20.	気泡形状可視化計測結果 .....	143
3.2.21.	エアロゾル粒子のアスペクト比への影響.....	144
3.2.22.	エアロゾル移行挙動実験装置.....	147
3.2.23.	不溶性粒子の移行挙動可視化計測結果 .....	149
3.2.24.	可溶性粒子の移行挙動可視化計測結果 .....	152
3.2.25.	界面におけるエントレイメント現象.....	153
3.2.26.	エアロゾル粒子の移行挙動.....	155
3.2.27.	エアロゾルを含む固気二相流の結果まとめ .....	157
3.3.	MELCOR による DF 解析.....	158
3.3.1.	プールスクラビングによる DF 解析の概要 .....	158
3.3.2.	プールスクラビングに関する流動モデル概要 .....	160
3.3.3.	プールスクラビングに係る除染モデル概要 .....	161
3.3.4.	解析体系および解析条件 .....	162
3.3.5.	エアロゾルの凝縮および沈降によるエアロゾルの除去.....	165
3.3.6.	蒸気-水系におけるプールスクラビング解析.....	169
	文献目録.....	175

## 図目次

図 3-1	単一気泡実験装置系統図 .....	5
図 3-2	単一気泡による DF 測定試験 試験部.....	6
図 3-3	MELCOR モデルにおいて想定される二相流挙動.....	10
図 3-4	MELCOR モデルにおいて想定される単一気泡中流動 .....	10
図 3-5	単一気泡実験装置全体図 .....	12
図 3-6	撮影方法ごとの光学系配置図.....	12
図 3-7	対面式 Scheimpflug 光学系の概要図 .....	13
図 3-8	本年度単一気泡実験装置に行った改造 .....	14
図 3-9	薄型実験装置全体図 .....	15
図 3-10	二波長干渉計の光学系.....	17
図 3-11	プリズムタイプの Mach-Zehender 干渉計の特徴 .....	18
図 3-12	本研究で使用する二波長 Mach-Zehender 干渉計 .....	18
図 3-13	蛍光粒子を用いた実験の概念図 .....	21
図 3-14	本実験にて使用する PIV 計測手法の概要.....	22
図 3-15	単一気泡挙動可視化実験系統図 .....	23
図 3-16	No Particle 条件における上昇気泡の時系列変化 撮影: camera1, ( $z = 0, 200, 400, 600$ mm), 5000fps, ( $t = 0, 0.02, 0.04$ s).....	24
図 3-17	エアロゾルとして OX-50 を投入した条件における上昇気泡の時系列変化 撮影: camera1, ( $z = 0, 200, 400, 600$ mm), 5000fps, ( $t = 0, 0.02, 0.04$ s) .....	24
図 3-18	エアロゾルとして BaSO <sub>4</sub> を投入した条件における上昇気泡の時系列変化 撮影: camera1, ( $z = 0, 200, 400, 600$ mm), 5000fps, ( $t = 0, 0.02, 0.04$ s) .....	25
図 3-19	エアロゾルとして CsI を投入した条件における上昇気泡の時系列変化 撮影: camera1, ( $z = 0, 200, 400, 600$ mm), 5000fps, ( $t = 0, 0.02, 0.04$ s).....	25
図 3-20	気泡可視化画像処理方法 .....	26
図 3-21	各高さ( $z = 0, 200, 400, 600$ mm)における平均アスペクト比 .....	28
図 3-22	各高さ( $z = 0, 200, 400, 600$ mm)におけるエアロゾル条件ごとの 平均アスペクト比の比較.....	29
図 3-23	ノズルから離脱後( $z = 0$ )から計測したエアロゾルごとの アスペクト比時系列変化の比較.....	30
図 3-24	各高さ( $z = 0, 200, 400, 600$ mm)における平均上昇速度.....	32
図 3-25	高さ( $z = 0, 200, 400, 600$ mm)におけるエアロゾルごとの上昇速度 .....	33
図 3-26	実験データをもとに行った局所上昇速度解析 .....	34
図 3-27	MELCOR 内部流動モデルを用いて計算した局所離脱速度 .....	37
図 3-28	界面に向かう速度 $V_n$ における速度分布の内訳( $d_i = 1 \mu\text{m}$ ) .....	38
図 3-29	気泡中エアロゾル離脱挙動可視化実験系統図 .....	39

図 3-30	ノズル離脱直後( $z = 0$ mm)における気泡中エアロゾルの離脱 .....	40
図 3-31	定常上昇中単一気泡( $z = 200$ mm)からのエアロゾル離脱挙動.....	41
図 3-32	ノズル直上( $z = 0$ )の実験にて設定した可視化領域.....	42
図 3-33	ノズル直上( $z = 0$ )の実験における気泡内部流動 .....	43
図 3-34	ノズル直上( $z = 0$ )の実験における粒子塊による界面変形.....	43
図 3-35	定常上昇する気泡( $z = 100$ mm)にて設定した可視化領域.....	44
図 3-36	薄型水槽にて撮影した Taylor Bubble .....	44
図 3-37	定常上昇する単一気泡内部流動 .....	45
図 3-38	油滴内部流動可視化実験系統図 .....	46
図 3-39	定常上昇する油滴( $z = 200$ mm, $d = 10.5$ mm)の内部流動可視化結果.....	47
図 3-40	実験にて観測された内部流動の流跡線と MELCOR にて想定される流跡線の 比較.....	49
図 3-41	ノズル離脱直後( $z = 0$ mm)における油滴内部流動の可視化画像 .....	50
図 3-42	ノズル離脱直後の油滴( $z = 0$ )の中心軸上での各時間( $t = 0, 0.013, 0.025$ s)に おける $z$ 方向速度分布 .....	50
図 3-43	各ノズル高さ( $z = 0, 200, 400, 600$ mm)における 油滴等価直径ごとの内部流 速可視化結果.....	52
図 3-44	各高さ位置( $z = 0, 200, 400, 600$ mm)における油滴等価直径ごとの油滴内部 流速の絶対値の平均値.....	53
図 3-45	油滴界面速度検出方法.....	54
図 3-46	界面における速度と MELCOR モデルの比較 .....	56
図 3-47	光学系によって生じた干渉縞.....	57
図 3-48	片側の光路のみで発生した干渉縞.....	57
図 3-49	二波長干渉計により得られた干渉縞.....	58
図 3-50	気泡の二相流流動評価実験 実験部概念図.....	64
図 3-51	二相流装置 系統図(案) .....	64
図 3-52	エアロゾルなしの条件下での実験系統図.....	65
図 3-53	今年度蒸気系統図 .....	66
図 3-54	試験水槽部周辺の概念図 .....	67
図 3-55	ノズル位置と水位の上下移動による相対的計測位置の調整 .....	68
図 3-56	製作したワイヤメッシュセンサ .....	70
図 3-57	WMS の概念図 .....	70
図 3-58	エアロゾル計測の実験体系.....	71
図 3-59	エアロゾル計測原理_概念図.....	72
図 3-60	濃度を概算するための計算体系 .....	73
図 3-61	エアロゾル濃度範囲 .....	74

図 3-62	バックライト法による可視化手法.....	75
図 3-63	BWR 圧力抑制プール内における温度成層化.....	77
図 3-64	熱電対の挿入図.....	78
図 3-65	ノズル流速一定条件時の噴流可視化画像.....	80
図 3-66	ノズル流速一定条件時の平均画像.....	81
図 3-67	気相流量一定条件時の噴流可視化画像.....	82
図 3-68	気相流量一定条件時の画像平均.....	83
図 3-69	WMS による流れ方向に対する時間平均.....	84
図 3-70	ノズル流速一定条件でのボイド率分布.....	85
図 3-71	気相流量一定条件でのボイド率分布.....	85
図 3-72	ノズル流速一定条件時の分解能比較.....	86
図 3-73	気相流量一定条件時の分解能比較.....	87
図 3-74	WMS による流れ方向に対する.....	88
図 3-75	気相流量一定条件時の平均流速.....	89
図 3-76	ノズル流速一定条件時の平均流速.....	90
図 3-77	個数割合に対する気泡径分布.....	92
図 3-78	体積割合に対する気泡径分布.....	93
図 3-79	温度成層形成過程の温度推移.....	94
図 3-80	温度成層パターン.....	95
図 3-81	噴流注入による液温変動( $Q_{air}= 50 \text{ L/min}$ , $D_{in}= 10 \text{ mm}$ ).....	96
図 3-82	温度成層におけるボイド率分布.....	97
図 3-83	温度成層における速度分布.....	97
図 3-84	ノズルにおける大気泡形成の可視化.....	98
図 3-85	大気泡径計測.....	99
図 3-86	ノズル径に対する等価直径比較( $Q_{air}= 2, 5, 9 \text{ L/min}$ , $D_{in}= 3, 6, 10 \text{ mm}$ ).....	100
図 3-87	気相流量に対する等価直径比較( $Q_{air}= 2, 5, 9 \text{ L/min}$ , $D_{in}= 3, 6, 10 \text{ mm}$ ).....	100
図 3-88	ノズル流速に対する等価直径比較( $v_n= 4.7, 11.8 \text{ m/s}$ , $D_{in}= 3, 6, 10 \text{ mm}$ ).....	101
図 3-89	ノズル内径 6mm のバルブ開放時の可視化画像.....	102
図 3-90	ノズル内径 10mm のバルブ開放時の可視化画像.....	103
図 3-91	ノズル内径 6mm の定常時の可視化画像.....	103
図 3-92	ノズル内径 10mm の定常時の可視化画像.....	104
図 3-93	ノズル内径 6mm のバルブ開放時の可視化画像.....	105
図 3-94	ノズル内径 10mm のバルブ開放時の可視化画像.....	106
図 3-95	ノズル内径 6mm の定常時の可視化画像.....	106
図 3-96	ノズル内径 10mm の定常時の可視化画像.....	107
図 3-97	ノズル先端における蒸気噴流.....	108

図 3-98	ノズル先端における空気噴流.....	109
図 3-99	ノズル先端における蒸気-空気混合気相噴流.....	109
図 3-100	蒸気噴流気泡径分布比較.....	110
図 3-101	気泡のアスペクト比の比較.....	112
図 3-102	低流量時の 3 種類のベント管形状係数による初期グロービュール径と.....	114
図 3-103	中高流量時の 3 種類のベント管形状係数による初期グロービュール径と..	115
図 3-104	気泡径分布と等価直径の比較.....	117
図 3-105	グロービュール分裂高さ <small>と</small> 小気泡ピーク値.....	118
図 3-106	グロービュール分裂高さ <small>と</small> 平均気泡径.....	119
図 3-107	流動構造計測実験.....	121
図 3-108	アモルファスシリカの粒径分布.....	122
図 3-109	硫酸バリウムの粒径分布.....	122
図 3-110	空気単相条件での三次元流動構造.....	123
図 3-111	エアロゾル粒子を含む固気二相流条件での三次元流動構造.....	124
図 3-112	流量 30L/min 条件での高さ毎のボイド率, 気相速度.....	125
図 3-113	流量 60L/min 条件での高さ毎のボイド率, 気相速度.....	126
図 3-114	流量 90L/min 条件での高さ毎のボイド率, 気相速度.....	127
図 3-115	時間あたりの個数濃度変化.....	128
図 3-116	エアロゾルの濃度の違いによる時間平均ボイド率.....	128
図 3-117	エアロゾルの濃度の違いによる時間平均気相速度.....	129
図 3-118	流量 30L/min 条件での空気単相, エアロゾル粒子にアモルファスシリカ, 硫酸バリウムを用いた条件での高さ毎のボイド率, 気相速度.....	130
図 3-119	流量 60L/min 条件での空気単相, エアロゾル粒子にアモルファスシリカ, 硫酸バリウムを用いた条件での高さ毎のボイド率, 気相速度.....	131
図 3-120	流量 90L/min 条件での空気単相, エアロゾル粒子にアモルファスシリカ, 硫酸バリウムを用いた条件での高さ毎のボイド率, 気相速.....	132
図 3-121	ノズル中央における高さ毎のボイド率変化.....	133
図 3-122	ノズル中央における高さ毎の気相速度変化.....	134
図 3-123	MELCOR によって算出されたスウォーム上昇速度と実験値の比較.....	136
図 3-124	各ノズル距離における噴流可視化画像.....	138
図 3-125	画像処理によって得られたエアロゾルの有無による気泡分布の違い.....	139
図 3-126	WMS によって得られたエアロゾルの有無による気泡分布の違い.....	140
図 3-127	気泡形状観測実験装置.....	141
図 3-128	気泡形状観測実験装置(上面図).....	142
図 3-129	可視化による気泡形状の違い.....	143
図 3-130	各ノズル距離におけるエアロゾルによる気泡形状の影響.....	145

図 3-131	ノズルから 200mm 上部におけるエアロゾルによる気泡形状の影響.....	145
図 3-132	ノズルから 600mm 上部におけるエアロゾルによる気泡形状の影響.....	146
図 3-133	エアロゾル粒子移行挙動可視化実験装置.....	147
図 3-134	エアロゾル粒子移行挙動可視化実験装置(上面図).....	148
図 3-135	気泡側面におけるエアロゾル粒子の移行挙動.....	149
図 3-136	時間毎の気泡の側面における移行挙動.....	150
図 3-137	気泡の側面における移行の PIV 画像.....	151
図 3-138	エアロゾル粒子の有無による噴流構造の違い.....	152
図 3-139	エアロゾルを含む固気二相流で見られるエントレイメント現象(10L/min) .....	153
図 3-140	エアロゾルを含む固気二相流で見られるエントレイメント現象(30L/min) .....	154
図 3-141	エアロゾル粒子が界面を超えて液相側へ移行する様子.....	155
図 3-142	エアロゾル粒子が噴流側部で界面変形によって液相側へ移行する様子.....	156
図 3-143	エアロゾルの質量分布 [MELCOR Computer code manuals(1.8.5)]	159
図 3-144	SPARC-90 における流動モデル.....	160
図 3-145	SPARC-90 における気泡モデル.....	160
図 3-146	SPARC-90 における除染モデル.....	161
図 3-147	解析体系.....	162
図 3-148	質量流量から求めた DF とプール部ガス中に残存するエアロゾル質量.....	166
図 3-149	各ボリューム中のエアロゾル質量.....	172
図 3-150	各ボリューム間のエアロゾル質量流量.....	173
図 3-151	除染係数の解析結果.....	174
図 3-152	プール水温を変えた際の除染係数.....	174

## 表目次

表 3-1	単一気泡による DF 測定試験基本仕様.....	4
表 3-2	単一気泡実験においてエアロゾルとして使用した粒子の物性.....	19
表 3-3	単一気泡実験にて使用する流体の物性.....	19
表 3-4	単一気泡挙動可視化実験の実験条件.....	20
表 3-5	気泡中エアロゾル離脱挙動可視化実験, 並びに気泡内部流動可視化実験にお ける実験条件.....	20
表 3-6	油滴を用いた内部流動可視化実験における実験条件.....	21
表 3-7	本解析にて使用した各種パラメータ.....	35
表 3-8	気泡の二相流挙動評価試験基本仕様.....	62
表 3-9	エアロゾルスpektロメーター仕様.....	72
表 3-10	エアロゾルジェネレーター仕様.....	74
表 3-11	低流量時の大気泡等価直径 $dB(Q_{air}= 2, 5, 9 \text{ L/min}, D_{in}= 3, 6, 10 \text{ mm})$ ....	99
表 3-12	中高流量時の等価直径 $dB(Q_{air}= 10, 50, 100 \text{ L/min}, D_{in}= 10 \text{ mm})$ .....	101
表 3-13	ベント管形状係数.....	113
表 3-14	MELCOR における計算式(5.4)から算出した初期グローブール径 $d_{g,o}$ ....	113
表 3-15	解析体系の主要なパラメータの入力値.....	163
表 3-16	エアロゾルの入力値.....	163
表 3-17	試験流体の入力値.....	163
表 3-18	解析条件.....	164
表 3-19	解析条件ごとの $DF_{EC}$ .....	170





# 1. 委託業務題目

平成 29 年度原子力施設棟防災対策費（スクラビング個別効果試験）事業

## 2. 業務委託の目的

BWR の重大事故では、ウェットウェルからの格納容器ベントを実施する際には、プール水中におけるスクラビング効果により核分裂生成物の除去効果が期待できる。しかし、福島第一原子力発電所事故においては、高温での急減圧により沸騰が発生し、必ずしも期待された効果が得られず、環境への放出量を増加させた可能性がある。これらのプール水中のスクラビング効果は PWR の蒸気発生器中の細管破断のような事故を含め、核分裂生成物が水中に放出される種々の状況において発生する。このようプールスクラビングに関わる原子力発電所事故の事例に関して描いた図を以下の図 1 に示す。重大事故発生時の環境へ放出する核分裂生成物量を正確に評価するための解析手法を開発する観点から、高温急減圧条件下等を含む幅広い条件のプール水におけるスクラビングによる核分裂生成物除去効果を定量的に評価する必要がある。加えて、現状のスクラビングに関する研究は、前述のプール水の減圧沸騰条件に加え、プール水へ流入するガスの非凝縮性ガス割合の幅広い条件範囲における、エアロゾル挙動及び二相流挙動、さらに双方の詳細な相互関係についての知見が不十分である。このため、スクラビングを解析的に評価する場合に使用するモデルの高度化又は妥当性確認への試験データの活用が困難な状況となっている。

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

## 3. 委託業務の内容

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

## 3.1. 単一気泡中のエアロゾル挙動測定実験

### 3.1.1. 実験装置の改造及び実験実施

プールスクラビング時における気泡発生からその上昇、液面到達までにおける単一気泡又は少数気泡の挙動及び気泡内外の詳細なエアロゾルの挙動を高い時空間解像度で把握するための実験を実施する。表 1 に実験の基本仕様を示す。また、図 4 に実験装置の系統図、図 5 に試験部の概略図を示す。図に示すように、水を溜めた試験部容器内にエアロゾルを混入させたガスを流入させ、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による可視化および PIV 等による速度場計測を実施して詳細に調査する。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、データを取得する。

今年度は昨年度までに整備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。

さらに、昨年度までに整備した実験装置を改造し、界面形状とエアロゾル挙動の相互作用に関する詳細実験情報を収集するための機能を追加する。

### 3.1.2. 実験データの整理

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

なお、この作業においては原子力規制庁の担当者と適宜協議しながら進めることとする。

表 3-1 単一気泡による DF 測定試験基本仕様

項目	内容		備考
装置構成	試験部容器（ポリカーボネート製）、コンプレッサあるいは窒素ポンプ、ボイラ、エアロゾル供給系、エアロゾル計測系、排水処理系		
計測機器	高速度カメラ、PIV 用粒子、		試験計画および予備試験により検討する。
試験条件	大気圧、常温～100℃		
作動流体	水－空気（窒素） 水－蒸気 水－蒸気－非凝縮性ガス－難溶解性エアロゾル 蒸気 3 条件はスケーリング特性の確認のため、 水以外の作動流体も考慮可 水-蒸気-非凝縮性ガス-難溶性エアロゾル		
試験パラメータ	ガス噴出し方向: 下, 横, 上 穴形状: 円 基本, 破損口形状 適宜, 理想化 口径: 3 種類 クエンチャ, ベント管を模擬し, スケーリングを考慮して寸法決定 ガス流出速度: 0.1～1m/s 弱 非凝縮性ガス濃度: 0～100% エアロゾル組成・粒径・濃度 サブクール度: 液温常温から飽和温度までの範囲 高さ方向に大きな温度勾配を設定する実験条件も含む サブマージェンス: 100mm～1000mm		
計測項目	計測対象	計測方法	
	気泡形状（重心位置, 重心軌道及び径, 界面形状などを評価）	高速度カメラによる撮影画像を元にした画像処理	
	気泡及びエアロゾル粒子の速度分布	気泡に対する 3 次元 PIV	
	エアロゾル濃度及びその変化 気泡内外	干渉計を用いた計測	

液相及び気相温度 実験装置内で複数点, 大まかな空間分布	実験装置の中に熱電対を投入	
液相内で温度清掃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		

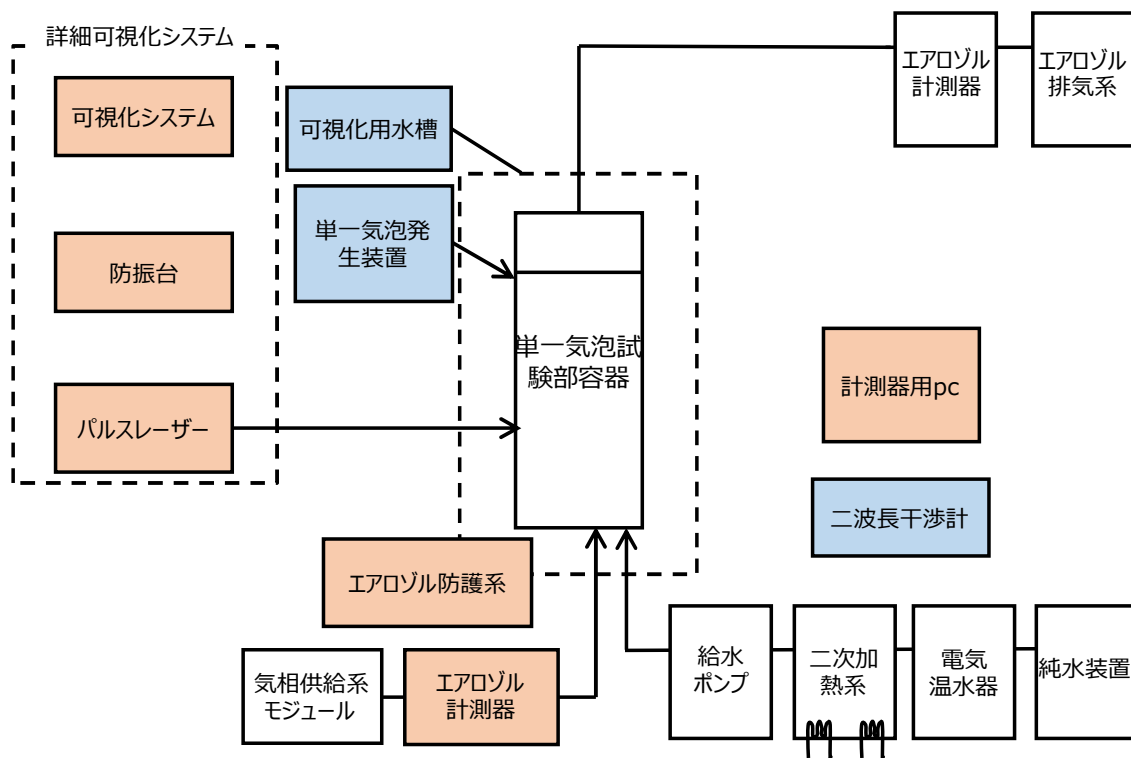


図 3-1 単一気泡実験装置系統図

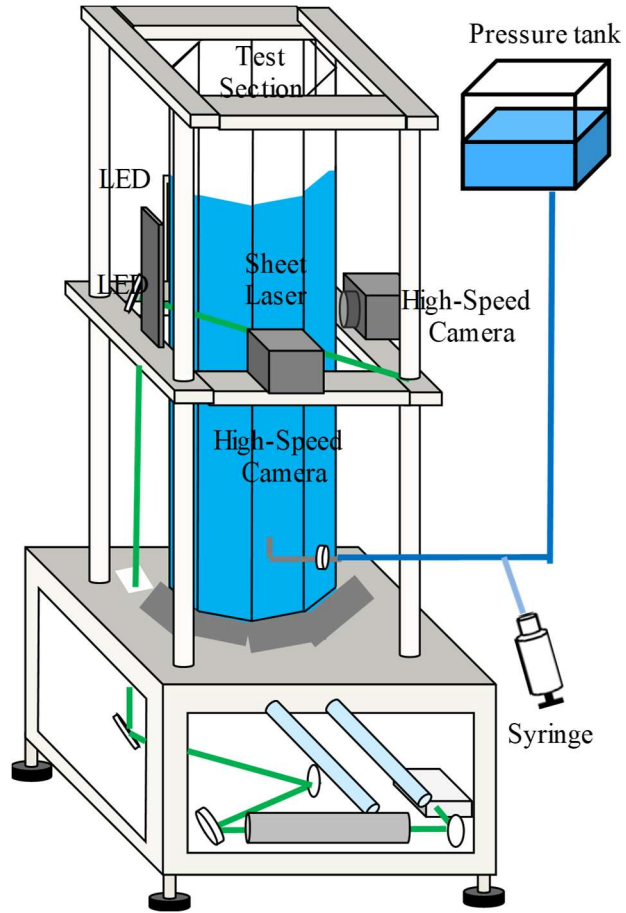


図 3-2 単一気泡による DF 測定試験 試験部

### 3.1.3. 本項目で着目する MELCOR モデル

原子力発電所の過酷事故進展解析コードとして広く用いられる MELCOR コード(Gauntt et al., 2000)にはプールスクラビングに関する物理モデルが定義されている。

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

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

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

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

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

MELCOR モデルにおいてスウォーム上昇領域はグローブユール領域から直接切り替わるのではなく、2 つの領域が混在し、遷移する挙動が考えられる。MELCOR モデルにおいては全気相体積におけるスウォームに含まれる体積である気相体積割合  $f_{gl}$ ならびに全気相がスウォーム上昇領域にあると仮定した  $DF$ である  $DF_{BB,i}$ を用いて、 $DF_{SR,i}$ を以下のように表す:

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

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

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

スウォーム上昇中の気泡において図 3-4 に示されるような単一気泡中の流動が想定されており、界面に向かう粒子の局所離脱速度の合計値  $V_{n,i}$  は以下の式(5)のように 4 つの駆動力による速度の合計であるとしている:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



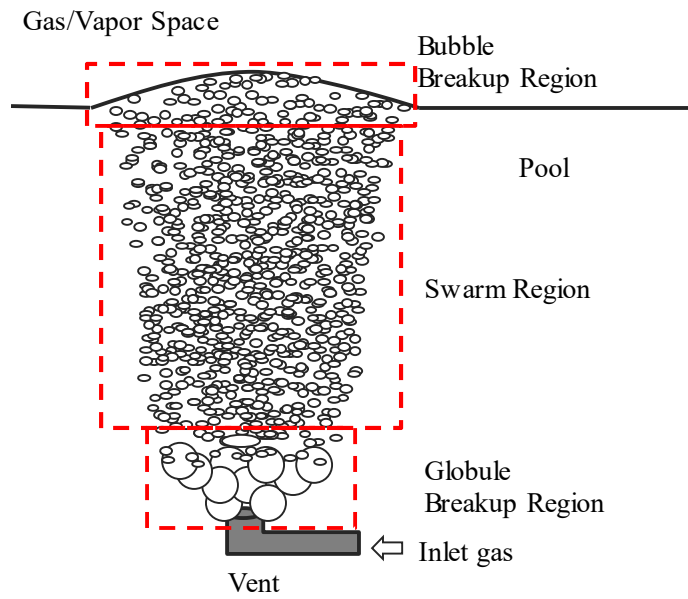


図 3-3 MELCOR モデルにおいて想定される二相流挙動

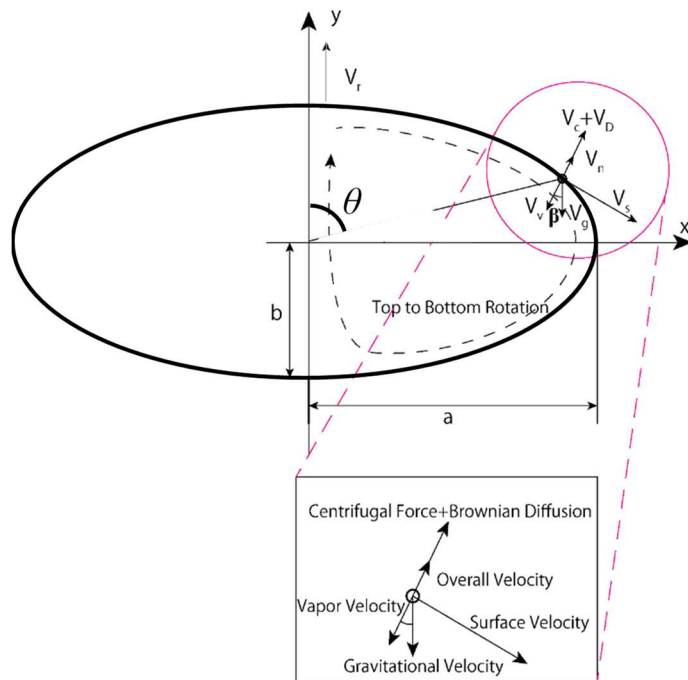


図 3-4 MELCOR モデルにおいて想定される単一気泡中流動

#### 3.1.4. 単一気泡実験装置の概要

本実験において使用する実験装置の全体図を図 3-5 に示す。本実験装置は試験を行う試験水槽部，上下動装置，光学系，背圧試験部の 4 点で構成されている。それぞれの部位に対する説明を以下に述べる。

試験水槽部は八角形のポリカーボネート製水槽(340×340×1500 mm)からなっており，水を満たし，八角形の各面に光学系を配置する構造となっている。水槽の底から 200 mm の位置にノズルが配置されており，ノズルは 2 種類の形状(ストレートタイプ，L 字タイプ)並びに 3 種類の口径( $d_i = 3, 5, 10 \text{ mm}$ )の計 6 種類を取り替えることのできる構造である。

上下動装置は AC サーボモータ(三菱電機製 HF-KP43B)並びにボールねじ，リニアシャフトにより構成されており，水槽内の各高さに対してノズル出口を原点( $z = 0$ )として無段階( $z = -100 - 1200 \text{ mm}$ )を上下し，上昇気泡の追従撮影や各高さに対する光学系の位置変更などに使用する。上下動装置は光学系を搭載する台が設置されており，M5 タップが 50 mm 間隔に設置されており，図 3-6 あに示すように二次元，三次元の計測方法ごとに光学系の組み換えを行う。

光学系はファイバーパルスレーザー(COHERENT 社製 LDP-100QMG，波長 532 nm)一台，LED 光源二つ，ハイスピードカメラ(Photron 社製 MiniUX200)二台からなっており，二次元，三次元の可視化計測に対応した機構となっている。三次元計測の手法としては図 3-7 に示す対面式 Scheimpflug 光学系を採用している。本光学系はピント平面・レンズの第一主面とカメラセンサー平面・レンズ第二主面の交点が主面の法線方向と一致するように光学系を組むことで二つのカメラ平面に対して同一ピント平面，同一可視化領域持つ構造を実現している。

単一気泡発生装置は背圧試験部に関しては水槽のノズルに直結し，背圧をかける水槽である。本水槽は上下動することでノズルから射出する際に気相にかかる背圧を調整する。背圧を調整することで気泡の射出条件を変更し，一種類のノズル径から複数の気泡径を持つ気泡や油滴を射出する。

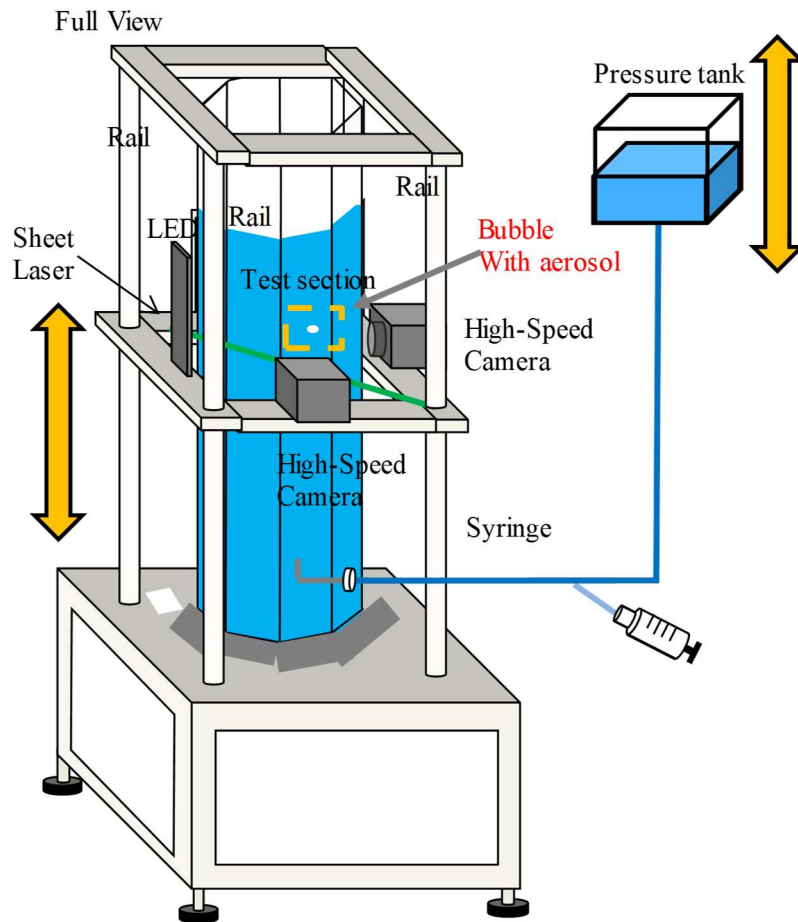


図 3-5 単一気泡実験装置全体図

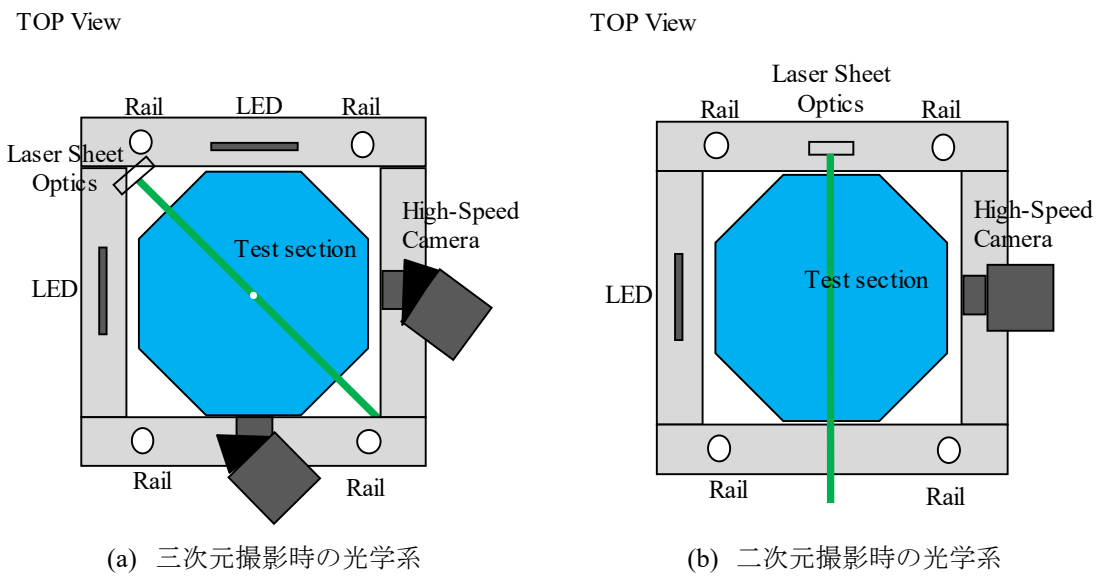


図 3-6 撮影方法ごとの光学系配置図

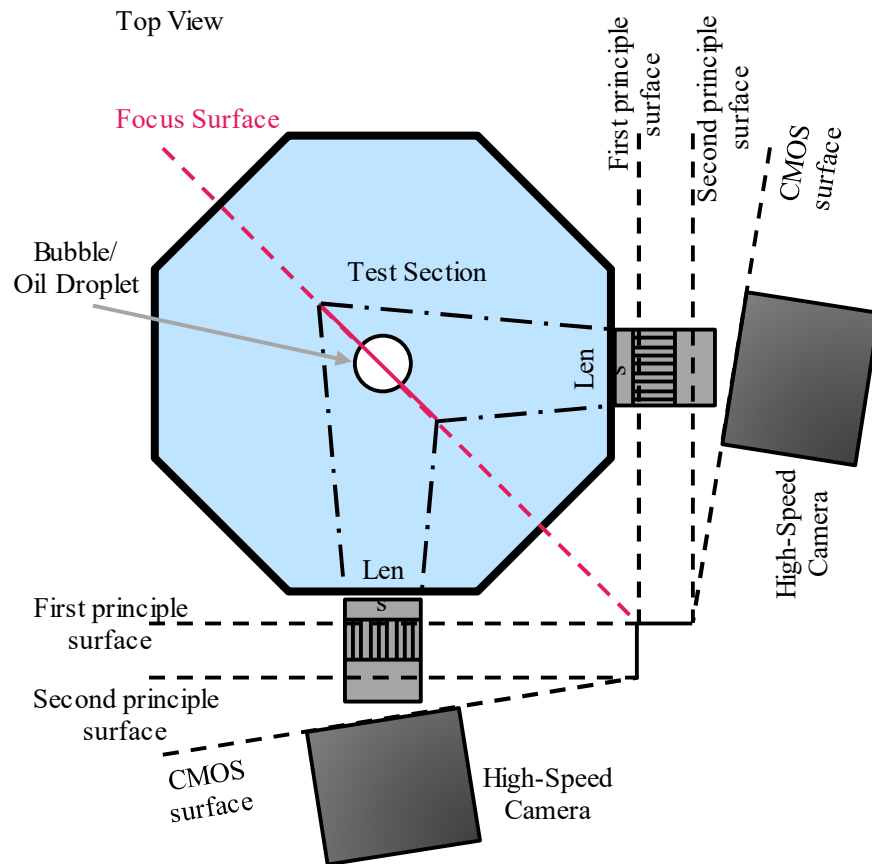


図 3-7 対面式 Scheimpflug 光学系の概要図

### 3.1.6. 本年度行なった単一気泡エアロゾル挙動実験における装置の改造

本年度，単一気泡実験装置に行った主な改造を図 3-8 に示す．本年度行った改造としては単一気泡を発生する際に径の調整や変更を行う単一気泡発生装置，従来の大型水槽より詳細な流動データを得るための詳細可視化システム，気泡界面における挙動を可視化する二波長干渉計，投入するエアロゾルを計測するエアロゾル計測器，各種計測器を作動させるための計測用 pc，エアロゾルを投入する際に粒子の飛散を抑制するエアロゾル防護系，粒子の汚れの影響を防ぐための可視化用水槽が挙げられる．

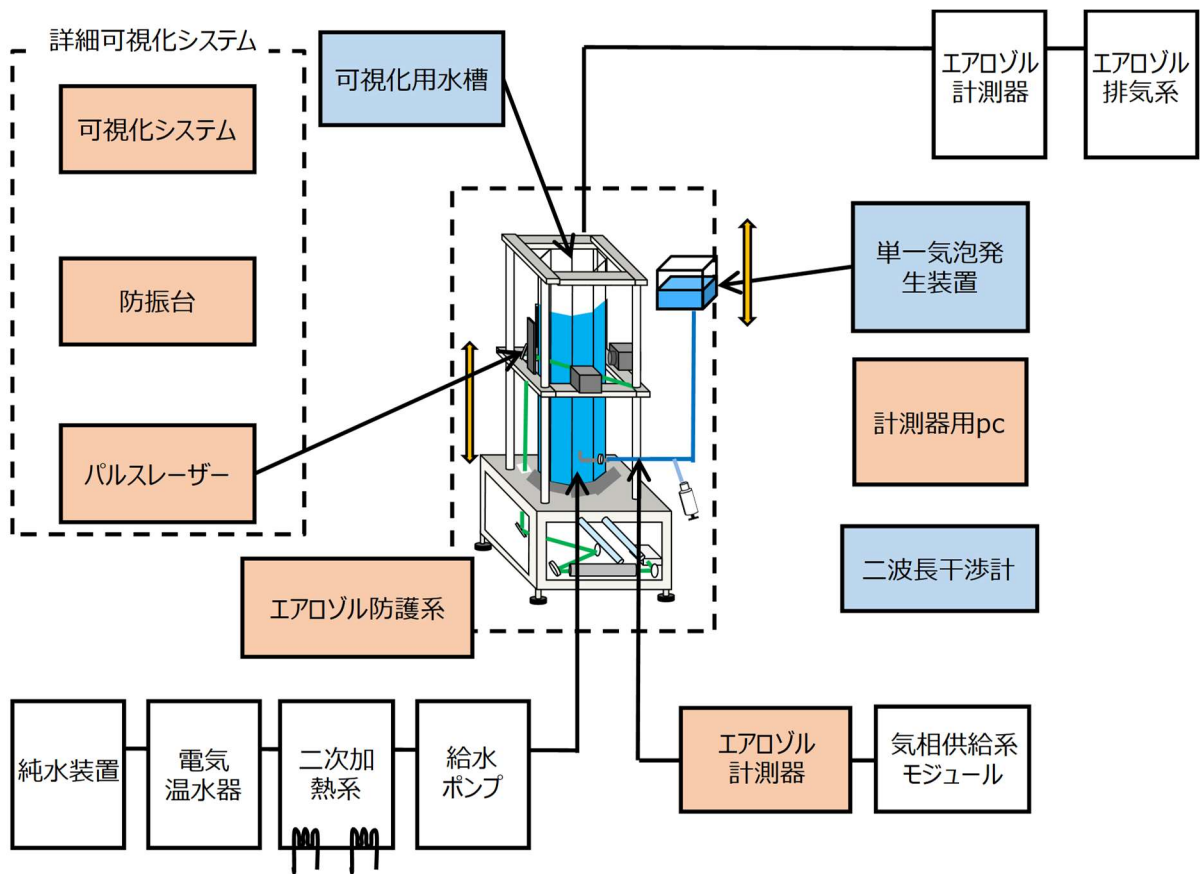


図 3-8 本年度単一気泡実験装置に行った改造

赤い四角は二相流装置との共用物品，青い四角は単一気泡実験装置専用物品

### 3.1.7. 薄型水槽実験装置の概要

薄型実験装置は薄型的水槽と光学系の二点で構成されており，以下の図 3-9 のような構成となっている．以下にそれぞれの装置の概要を示す．

水槽は厚さ 3 mm(500×300×3 mm)のアクリル製であり，等価直径数 mm オーダーの気泡が Taylor bubble として上昇する厚さとなっている．水槽底部には直径 3 mm のノズルが空いており，エアロゾルを混入したシリンジからノズルを通じて水槽中に気泡を投入する構造となっている．

光学系は高速度カメラ(Photron 社製 MiniAX200)で構成されており，カメラの面に対して約 30 度の角度から拡散光学系を通じてレーザー(日本レーザー製 DPGL-5W，出力 5 W，波長 532 nm)を照射する．光学系に関してはシート光光学系並びに拡散光学系の両面から検討を行い，薄型水槽の特性上より蛍光粒子を可視化するのに十分な光量を確保できる拡散光学系を使用した．

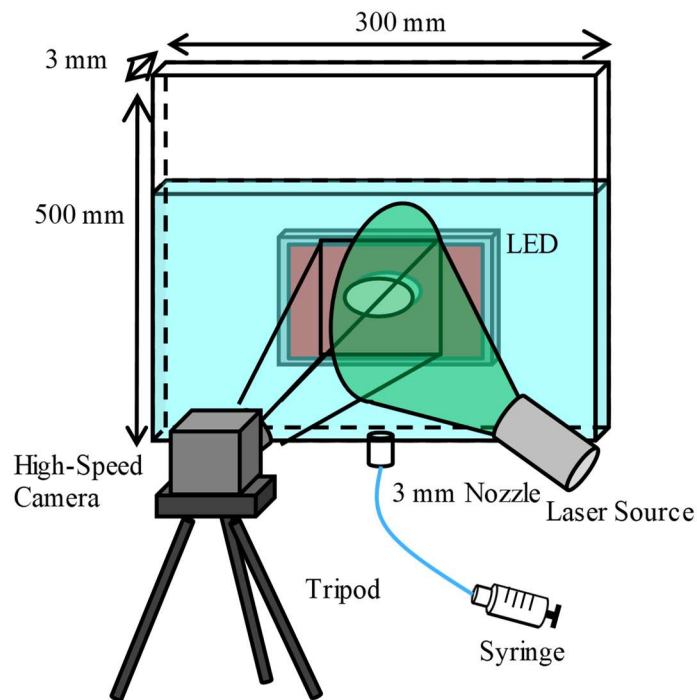


図 3-9 薄型実験装置全体図

### 3.1.8. Mach-Zehnder 干渉計の概要

Mach-Zehnder 干渉計は図 3-10 のようにレーザーから照射された光が参照物を通じてカメラまで届く物体光，並びに同じ行路長で参照物がない状態にてカメラまで届く参照光の光路差によりできる干渉縞をもとに物体の密度や温度を計測する干渉計である．以下に Mach-Zehnder 干渉計による干渉縞の式を示す．

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \times \cos(\phi_0(x, y) - \phi_r(x, y)) \quad (11)$$

$a(x, y)$ ,  $b(x, y)$  はそれぞれ干渉縞の平均強度，並びに振幅であり，干渉縞の画像からこれらの値を読み取る．ここで， $\phi_0(x, y) - \phi_r(x, y) = 2n\pi$  ( $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ) の時，干渉縞は明線， $\phi_0(x, y) - \phi_r(x, y) = (2n - 1)\pi$  ( $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ) の時干渉縞は暗線となる．ここで，光路差が 1 波長であるとすれば位相は  $2\pi$  ずれるため，位相差を  $\Delta L$ ，波長を  $\lambda$  とし，位相差は以下のように表される．

$$\phi_0(x, y) - \phi_r(x, y) = \frac{2\pi\Delta L}{\lambda} \quad (12)$$

光が物体を透過する際，光路長は物質の密度，温度に依存しており，一波長の場合はそれらの影響を切り離して考えることはできない．本研究においては二波長干渉計を用いることで温度，密度に対して二種類の干渉縞を用いることでそれぞれの影響を個別に評価することを可能にする．

本実験において使用する干渉計は図 3-11(a) に示す従来型の 2 枚のミラー，二枚のビームスプリッターで構成された干渉計ではなく，図 3-11(b) に示すミラーとビームスプリッターを繋げたプリズムを使用した干渉計(飯室機械製 IM-MZM210G)を使用する．本構造を適用する目的は 4 枚のミラー，ビームスプリッターの位置を変更するのではなく，2 つのプリズムの位置のみを変更することで良質な干渉縞を生成することにある．

本実験装置に使用する光学系を図 3-12 に示す．干渉計のテスト部には光学定盤が設置されており，25 mm 間隔で M5 タップが切られている．定盤の上部に水槽を設置されており，レーザー入射，出射部には石英ガラスを使用が使用されている．水槽底部のノズル径は 3 mm であり，コンプレッションプラグを上下させることで気泡の射出を行う．

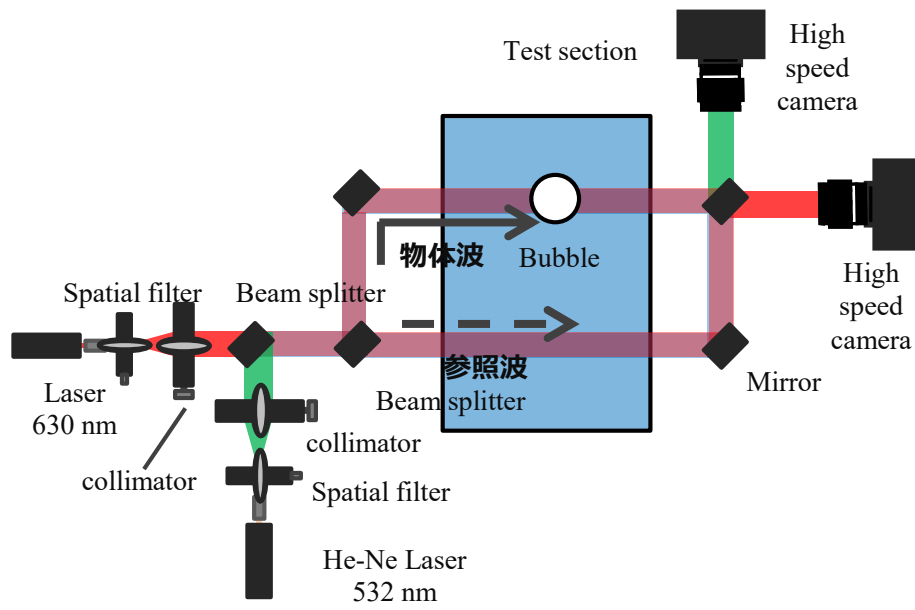
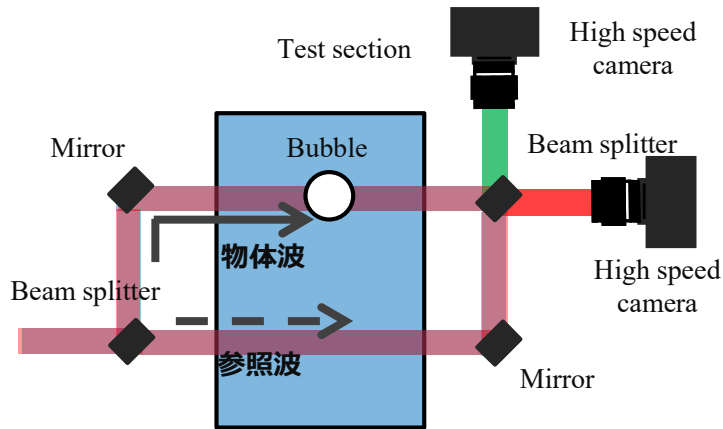
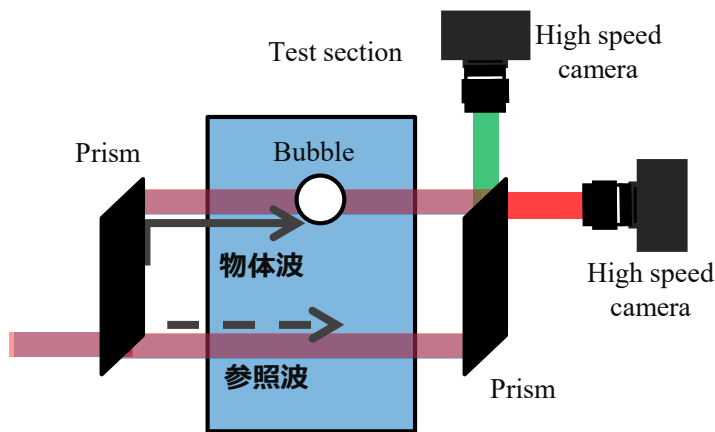


図 3-10 二波長干渉計の光学系





(a) 従来の研究で用いられる Mach-Zehnder 干渉計



(b) 本実験において使用するプリズムタイプの Mach-Zehnder 干渉計

図 3-11 プリズムタイプの Mach-Zehnder 干渉計の特徴

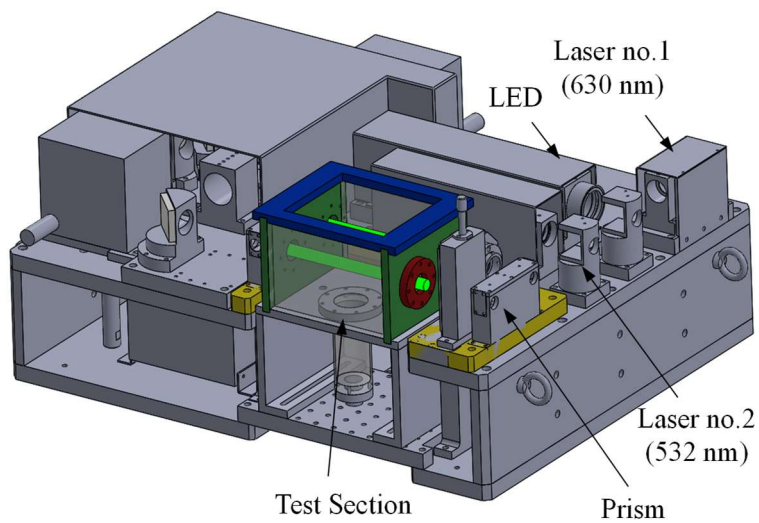


図 3-12 本研究で使用する二波長 Mach-Zehnder 干渉計

### 3.1.9. 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，気泡の上昇速度，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気泡の上昇速度，気泡の重心位置，軌道，等価直径，アスペクト比，気泡内部流動，エアロゾルの種類である．

### 3.1.10. 単一気泡実験において使用したエアロゾル粒子の物性

本実験では過酷事故において想定される気泡内エアロゾルの模擬のため，以下の表 3-2 に示す 4 種類の粒子を使用した．粒子は不溶性粒子として親水性シリカ粒子の OX-50，既存研究で多く使用される硫酸バリウム(BaSO<sub>4</sub>)，可溶性粒子として実機などで想定されるヨウ化セシウム(CsI)，レーザーを用いた可視化計測を行う蛍光粒子として FLUOSTAR を選択した．

表 3-2 単一気泡実験においてエアロゾルとして使用した粒子の物性

Test particle	Density [g/cm <sup>3</sup> ]	Diameter [μm]	Remarks
OX-50	1.8	0.04	Hydrophilic
BaSO <sub>4</sub>	4.3	0.64	Insoluble
CsI	3.8	No Data	Soluble
FLUOSTAR	1.1	15	Fluorescence

### 3.1.11. 単一気泡実験にて使用する流体の物性

本実験において使用した流体の物性を以下の表 3-3 に示す．本実験において水-空気系と水-シリコンオイルの二種類を使用した．水-空気系の条件においては主に気泡挙動やエアロゾルの離脱，Taylor Bubble などの条件において内部流動の計測を実施する．内部流動の計測においては気液界面における屈折率の差が大きいため，気泡界面において光が複雑に屈折することで内部流動の詳細な可視化は難しい．そこで，本実験においては水より比重が軽いこと，屈折率は水とほぼ一致することの二つの条件のもと試験流体としてシリコンオイル(KF-96L-0.65cs)を選定した．

表 3-3 単一気泡実験にて使用する流体の物性

Test fluid	Density[Kg/m <sup>3</sup> ]	Viscosity[mPa·s]	Interfacial Tension [N/m]	Refractive Index [-]
Air	1.205	1.822	-	1.000
Silicon Oil	760	0.494	0.039 <sup>*1</sup>	1.375
Water	998.2	1.004	0.073 <sup>*1</sup>	1.333

\*1 値は空気に対するものである

### 3.1.12. 単一気泡実験における実験条件

単一気泡挙動可視化計測実験において行った実験条件を表 3-4 に示す。以下に示す 16 条件にて実験を行った。各条件はそれぞれノズル径  $d = 3$  mm, 常温常圧の条件の元でノズル位置を原点とした高さ方向座標 ( $z = 0, 200, 400, 600$  mm), エアロゾルの種類(エアロゾルなし, ヨウ化セシウム, OX50, 硫酸バリウム)の四条件においてそれぞれ実施した。各実験は 3 回ずつ行い, それぞれのデータにおいて 300-1000 時間ステップ分の画像を取得した。

本実験における No Particle とはあくまでエアロゾル粒子が入っていない気泡を射出した場合を指し, 完全に不純物のない Clean Bubble ではない。

表 3-4 単一気泡挙動可視化実験の実験条件

Aerosol Particle	No Particle	No Particle	No Particle	No Particle	Aerosol CsI	Aerosol CsI	Aerosol CsI	Aerosol CsI
Height [mm]	0	200	400	600	0	200	400	600
Temperature [°C]	20							
Nozzle Diameter [mm]	3							
Pressure	Atmospheric							

Aerosol Particle	Aerosol OX50	Aerosol OX50	Aerosol OX50	Aerosol OX50	Aerosol BaSO <sub>4</sub>	Aerosol BaSO <sub>4</sub>	Aerosol BaSO <sub>4</sub>	Aerosol BaSO <sub>4</sub>
Height [mm]	0	200	400	600	0	200	400	600
Temperature [°C]	20							
Nozzle Diameter [mm]	3							
Pressure	Atmospheric							

気泡中エアロゾル離脱挙動可視化実験にて行った実験条件を以下の表 3-5 に示す。エアロゾルとしては蛍光粒子である FLUOSTAR を使用した。蛍光粒子を使用した理由は図 3-13 に示すようにハイパスフィルターを用いて気液界面における反射光のみを取り除き, エアロゾル粒子の挙動を可視化することを容易にするためである。

表 3-5 気泡中エアロゾル離脱挙動可視化実験, 並びに気泡内部流動可視化実験における実験条件

Continuous Phase	Dispersed Phase	Aerosol Particle	Pressure	Nozzle Diameter [mm]
Water	Air	FLUOSTAR	Atmospheric	3

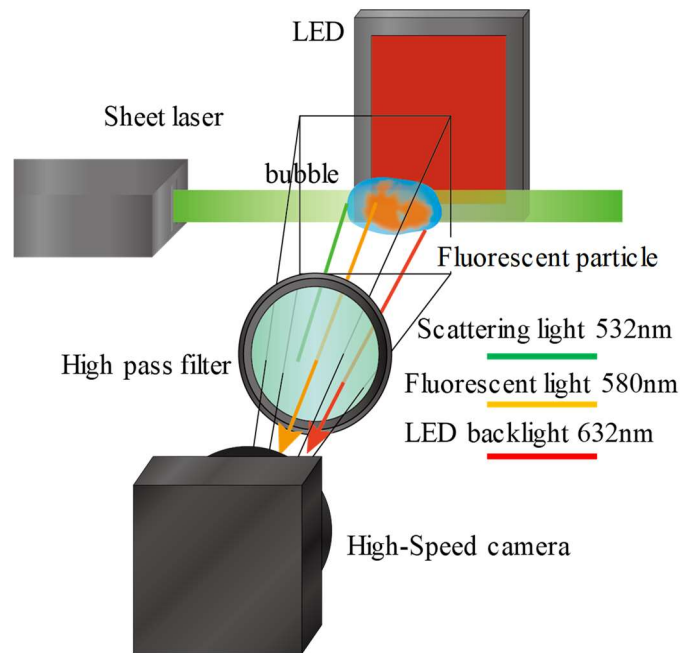


図 3-13 蛍光粒子を用いた実験の概念図

表 3-6 に油滴を用いた内部流動可視化実験における実験条件を示す。分散相側の作動流体として水との屈折率の差が小さいシリコンオイルを使用した。油滴界面における微小な散乱光を防ぐため、油滴内部に投入する微粒子は蛍光粒子である FLUOSTAR を用いた。実験はパラメータとして複数の油滴径を用いるため、3,6,10 mm の 3 種類のノズルをそれぞれ用いて油滴の射出を行った。

また、各実験は高さ方向座標( $z=0, 200, 400, 600$  mm)をパラメータとしてとり、各条件において 30 – 400 ステップの画像を取得した。

表 3-6 油滴を用いた内部流動可視化実験における実験条件

Nozzle Diameter [mm]	3	6	10
Equivalent Diameter [mm]	4.0 - 4.5	8.0 - 8.5	10.5 - 11
Particle	FLUOSTAR		
Continuous Phase	Water		
Dispersed Phase	Silicone Oil(KF-96L-0.65cs)		
Pressure	Atmospheric		
Temperature [°C]	20		

### 3.1.13. PIV 処理手法

Particle Image Velocimetry(PIV)とは、可視化した粒子の散乱光などのパターンから流速や速度方向を計測する手法である。光学系は撮影を行うハイスピードカメラ、粒子の散乱光を得るための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 3-14 に示す。まず、ある流れに対して複数時間ステップを持った画像を用意する。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 **Koncerto2**)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。

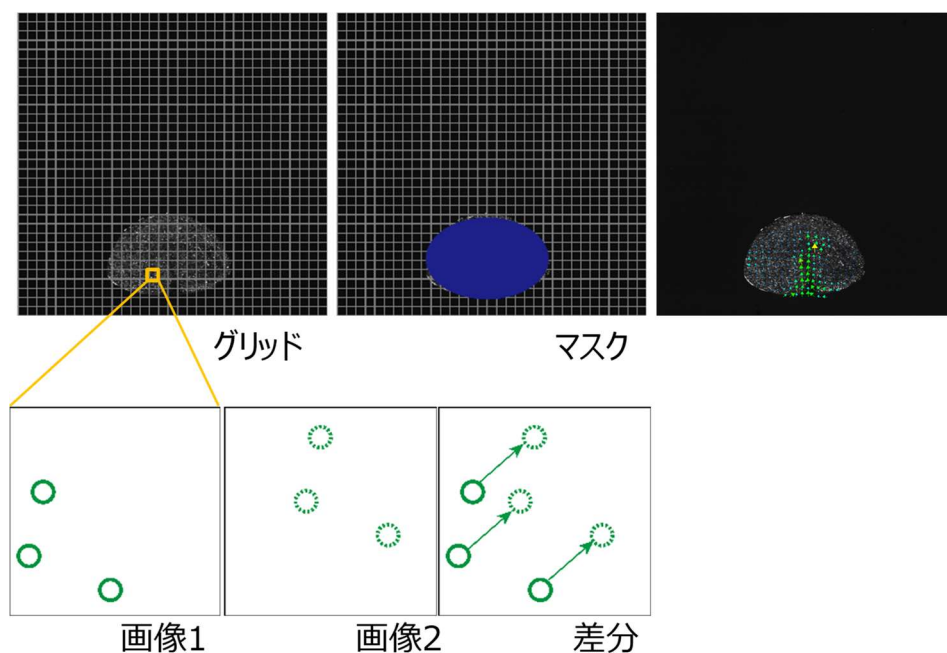


図 3-14 本実験にて使用する PIV 計測手法の概要

### 3.1.14. 単一気泡挙動可視化実験

#### 3.1.14.1. 単一気泡上昇挙動の可視化計測

本実験において使用した単一気泡挙動可視化実験の系統図を以下の図 3-15 に示す。本実験においては三次元運動を行う気泡の挙動を可視化するために二台のカメラ、並びに LED バックライトを直角に配置した光学系で構成した。実験条件は表 3-4 に示すようにパラメータとしてノズルからの高さ( $z=0, 200, 400, 600$ )をとり、三回ずつ撮影を行った。気泡は 3 mm ノズルから射出し、各エアロゾル条件(エアロゾルなし、ヨウ化セシウム、OX50、硫酸バリウム)において三回ずつ試験を行い、その平均値をとった。

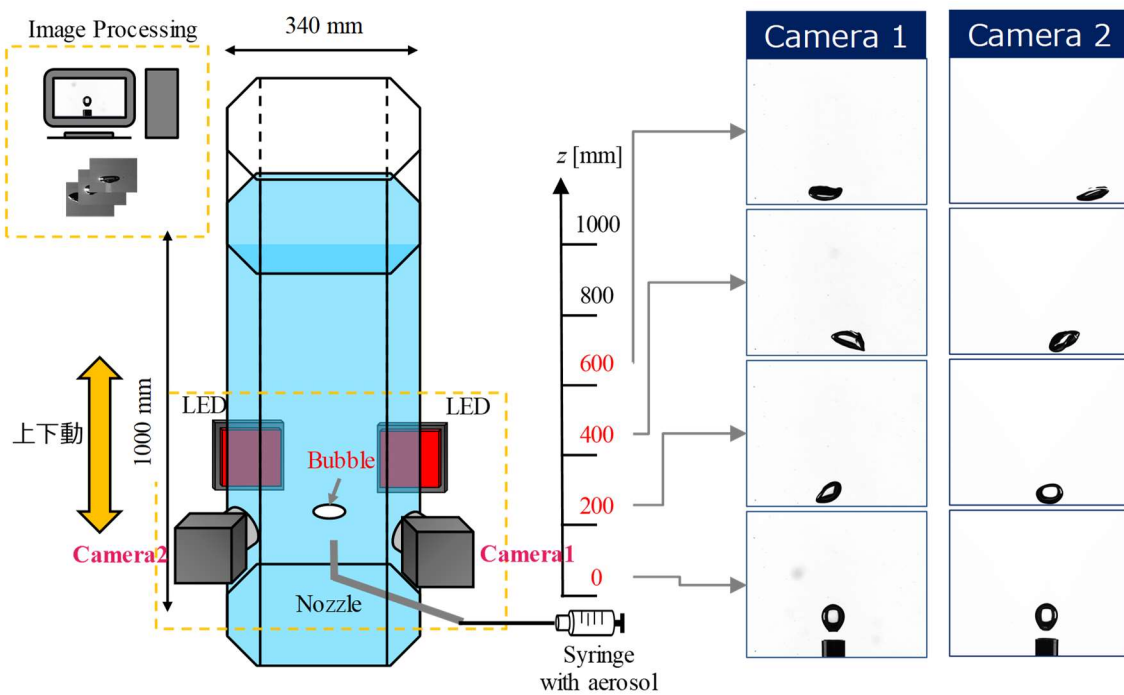


図 3-15 単一気泡挙動可視化実験系統図

以下の図 3-16, 図 3-17, 図 3-18, 図 3-19 に各エアロゾル条件における可視化結果を示す。撮影条件は図 3-16, 図 3-17, 図 3-19 においてはそれぞれ 5000 frame/s, シャッタースピード 1/5000 s, 画像のサイズは 1024×1024 pixel となっている。図 3-18 においてのみ, 5000 frame/s, シャッタースピード 1/5000 s, 画像のサイズは 1024×1280 pixel に条件を変更した。

可視化結果から、全領域においてヨウ化セシウム条件のみ扁平が小さく、より真球に近い形状を取ることがわかる。全ての条件において気泡射出直後( $z=0$  mm)はノズルの影響により扁平が小さい領域が見られたものの、気泡が上昇した領域( $z=200, 400, 600$  mm)の領域においては特に大きな変化は見られなかった。

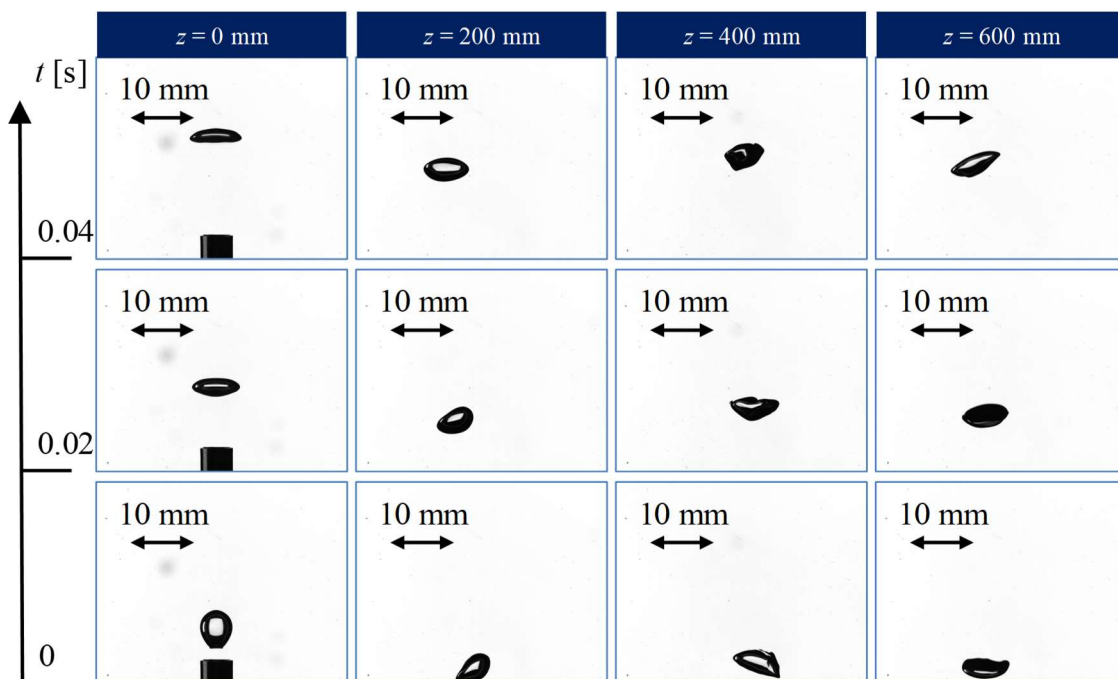


図 3-16 No Particle 条件における上昇気泡の時系列変化  
 撮影: camera1, ( $z = 0, 200, 400, 600$  mm), 5000fps, ( $t = 0, 0.02, 0.04$  s)

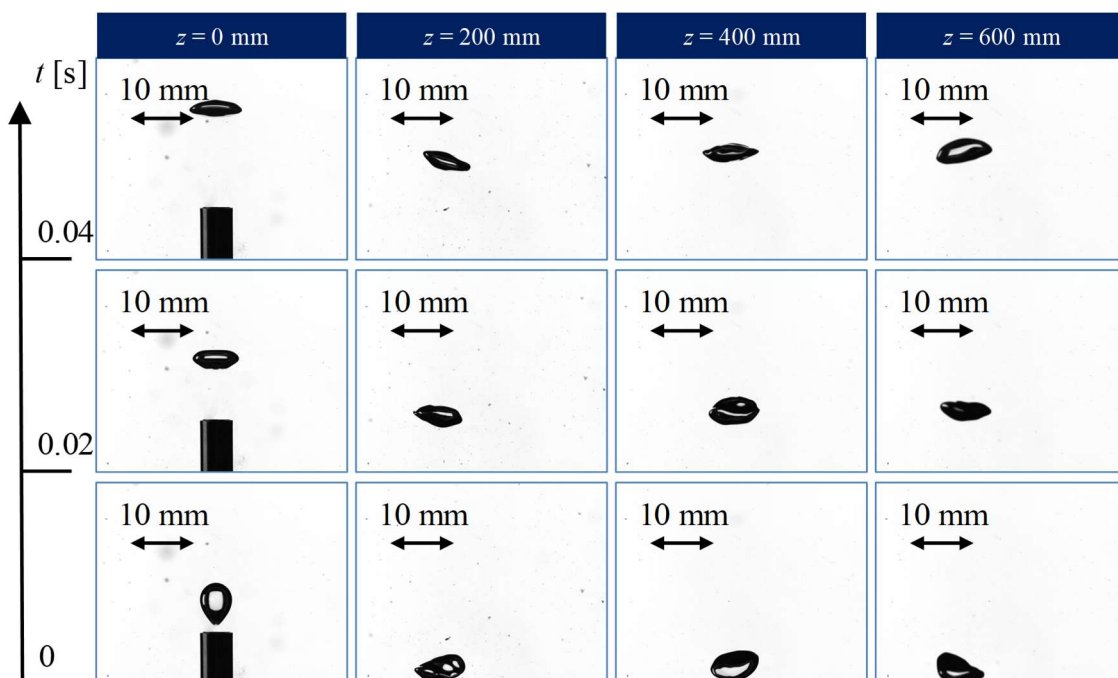


図 3-17 エアロゾルとして OX-50 を投入した条件における上昇気泡の時系列変化  
 撮影: camera1, ( $z = 0, 200, 400, 600$  mm), 5000fps, ( $t = 0, 0.02, 0.04$  s)

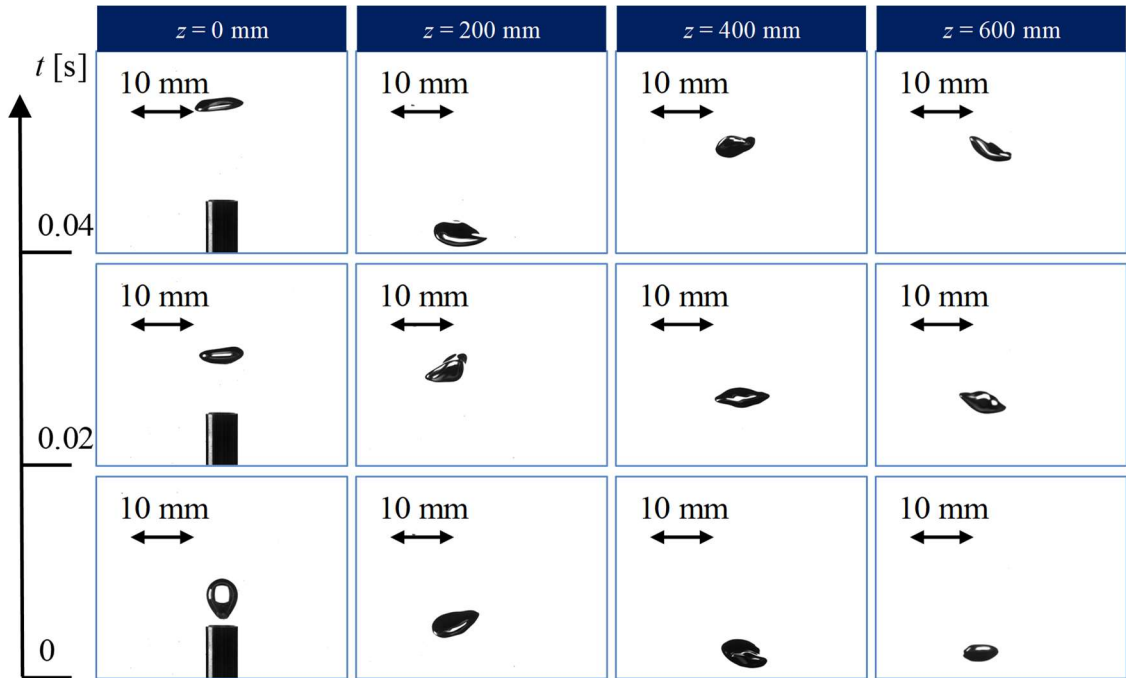


図 3-18 エアロゾルとして  $\text{BaSO}_4$  を投入した条件における上昇気泡の時系列変化  
 撮影: camera1, ( $z = 0, 200, 400, 600$  mm), 5000fps, ( $t = 0, 0.02, 0.04$  s)

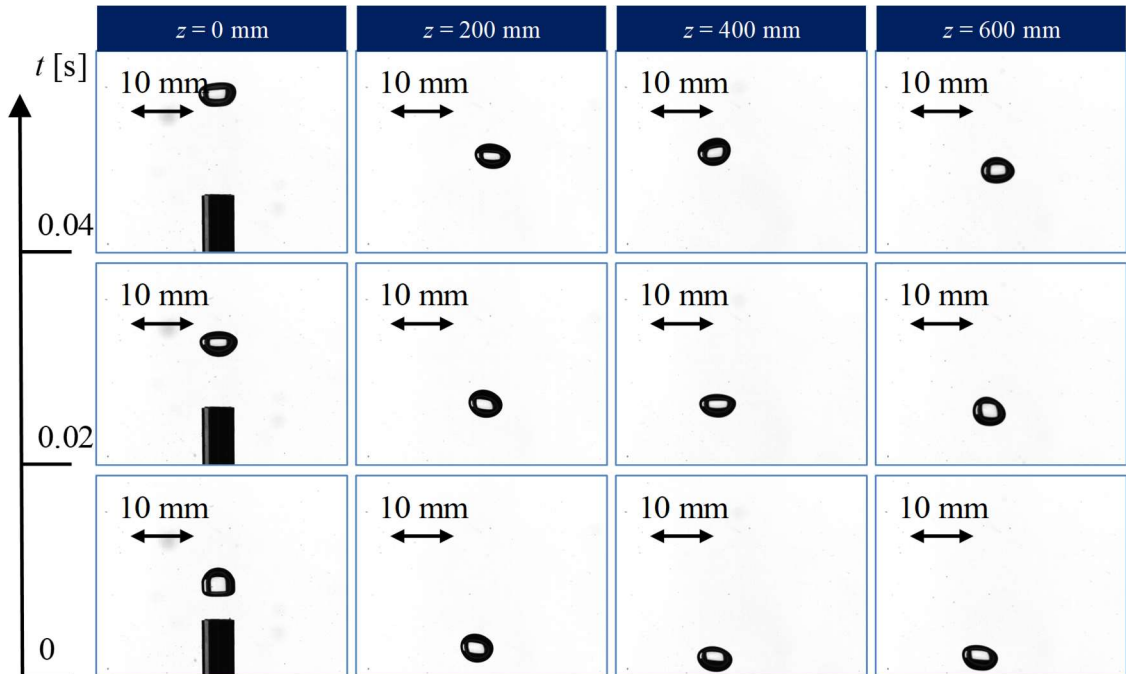


図 3-19 エアロゾルとして  $\text{CsI}$  を投入した条件における上昇気泡の時系列変化  
 撮影: camera1, ( $z = 0, 200, 400, 600$  mm), 5000fps, ( $t = 0, 0.02, 0.04$  s)



本実験において撮影を行った気泡のパラメータを定量的に評価するため、以下の図 3-20 に示すような画像処理を行った。元画像は二値化処理を行ったのち、ガウシアンフィルターを用いて水中の粒子など気泡に関係のないパラメータを除去、モルフォロジー処理により気泡を黒塗りすることで気泡を黒く塗りつぶした。

画像の中から黒塗りした部分に対しての画像内重心を計測することで気泡重心の  $x$  座標、 $y$  座標並びに  $z$  座標の計測を行った。この際、camera1 による任意の時間における  $z$  座標を  $z_{11}$ 、camera2 による  $z$  座標を  $z_{12}$ 、一つ後のステップの camera1 による  $z$  座標を  $z_{21}$ 、camera2 における  $z$  座標を  $z_{22}$  としてある任意のステップにおける上昇速度  $V_{z_{n,e}}$  は以下のように計算した：

$$V_{z_{n,e}} = \{(z_{21} - z_{11}) + (z_{22} - z_{12})\} / 2\Delta t \quad (13)$$

また、黒塗りした部分の輪郭を用いて最小二乗法から気泡の概形を楕円近似し、長径と短径からアスペクト比を取得した、この際、camera1 による任意の時間における長軸を  $a_1$ 、短径を  $b_1$ 、camera2 による長軸を  $a_2$ 、短径を  $b_2$ 、としてアスペクト比  $E_{n,e}$  を以下のように計算した：

$$E_{n,e} = \frac{(b_1 + b_2) / 2}{(a_1 + a_2) / 2} \quad (14)$$

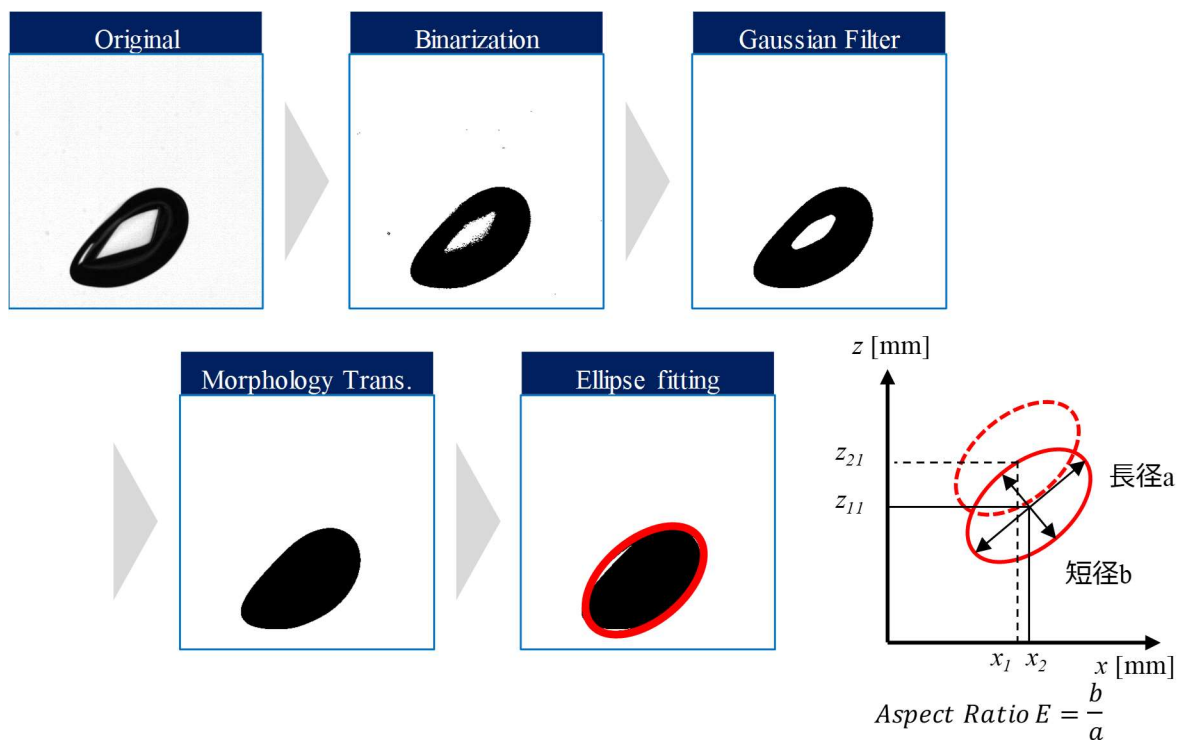


図 3-20 気泡可視化画像処理方法

### 3.1.14.2. 各エアロゾル条件におけるアスペクト比

図 3-21 において、各高さ( $z=0, 200, 400, 600$ )において測定したアスペクト比を各エアロゾル条件(エアロゾルなし, ヨウ化セシウム, OX50, 硫酸バリウム)において MELCOR モデルにおいて想定される式, 並びに Wellek らによる既存の式と比較したものを示す.

各時間ステップにおいて計測されたアスペクト比を  $E_{n,e}$ , 各実験におけるステップ数を  $N_e$  として, 三回行った実験値の平均アスペクト比を算出した式を以下に示す:

$$\bar{E} = \frac{1}{3} \sum_{e=1}^3 \frac{\sum_{n=0}^{N_e} E_{n,e}}{N_e} \quad (15)$$

以下に, MELCOR モデルにて想定されるアスペクト比の式を示す(Owczarski et. al., 1991):

$$E = \begin{cases} 1 & (d < 0.15) \\ 0.84107 + 1.13466d + 0.3795d^2 & (0.15 < d < 1.3) \\ 1.675 & (d > 1.3) \end{cases} \quad (16)$$

なお, 等価直径  $d$  の単位は [cm] となっており, 実験で使用した平均値から与えた. 等価直径の式を以下に示す:

$$\bar{d}_e = \frac{\sum_{n=0}^{N_e} d_{n,e}}{N_e} \quad (17)$$

Wellek らによるアスペクト比を示す式は以下のように表される(Wellek et. al. 1966):

$$E = \frac{1}{1 + 0.163Eo^{0.757}} \quad (18)$$

なお, 式中的エトベス数  $Eo$  は等価直径  $d$ , 液相密度  $\rho_l$ , 気相密度  $\rho_g$ , 並びに表面張力  $\sigma$  を用いて以下のように表される:

$$Eo = \frac{g(\rho_l - \rho_g)\bar{d}_e^2}{\sigma} \quad (19)$$

本式に対してそれぞれ三回行った等価直径の実験データを用い, 実験結果の平均値を適用することで以下のアスペクト比平均値を得た:

$$\bar{E} = \frac{1}{3} \sum_{e=1}^3 E(\bar{d}_e) \quad (20)$$

グラフから分かるようにエアロゾルなし、OX50、硫酸バリウムの三条件においてはアスペクト比の実験値が MELCOR、並びに Wellek らの式を共に下回る結果が得られた。一方で、ヨウ化セシウム条件においては Wellek らの式、並びに MELCOR の式と近い値を示し、特に MELCOR モデルにおいて想定される式と良い一致を示した。

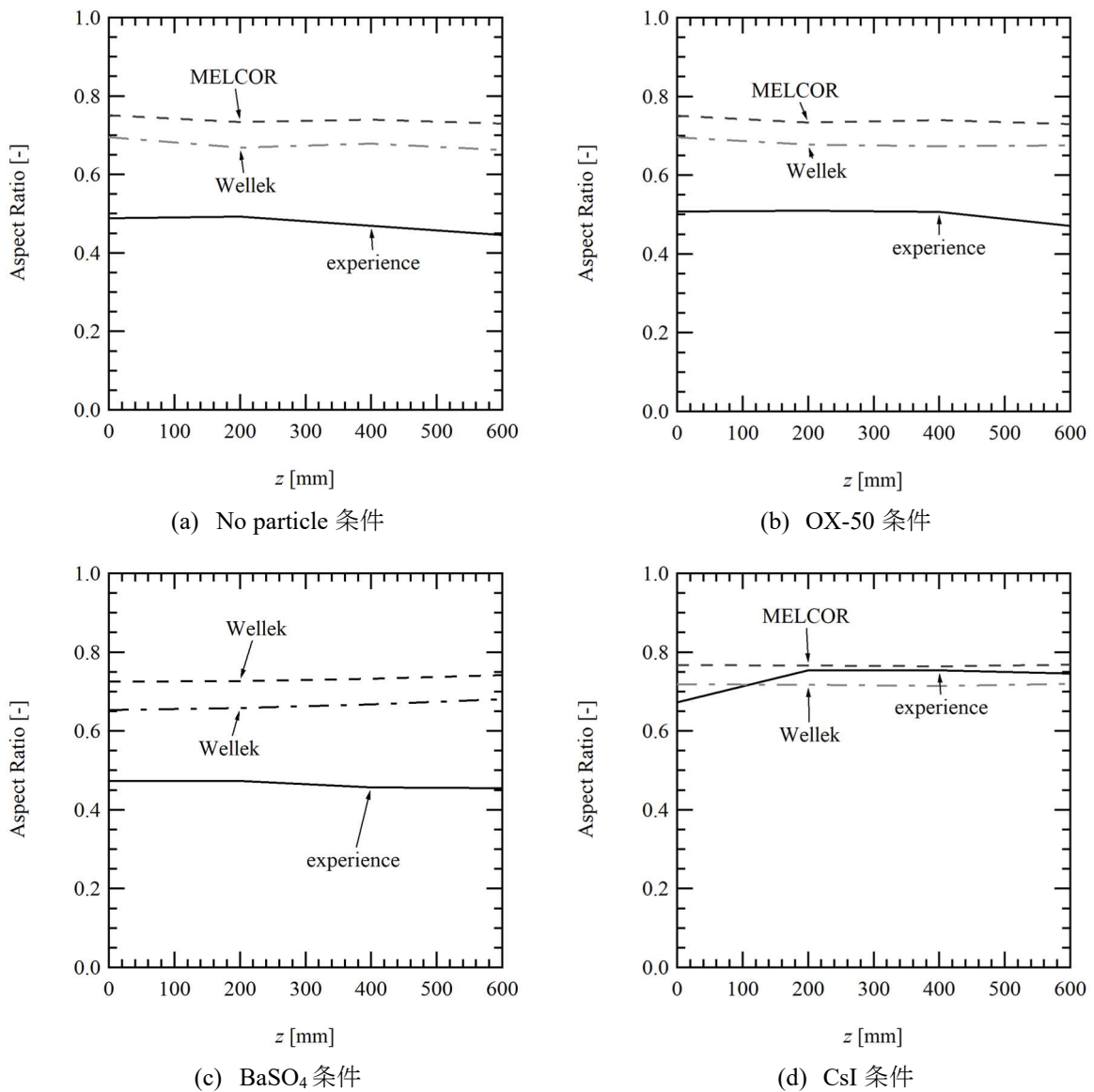


図 3-21 各高さ( $z=0, 200, 400, 600$  mm)における平均アスペクト比

図 3-22 に各エアロゾル条件(エアロゾルなし, ヨウ化セシウム, OX50, 硫酸バリウム)ごとのアスペクト比の比較を示す. 図から明らかなように, ヨウ化セシウム条件においてのみアスペクト比がより近い値を示した. 一方で, 不溶性粒子の条件(OX50, 硫酸バリウム)においては粒子が入っていない条件に比べてわずかに扁平が大きい傾向が見られた.

図 3-23 には, ノズル離脱直後から 70 ms 後までのアスペクト比時系列変化を示す. グラフからは CsI 条件のみアスペクト比発振の幅が小さいこと, また一方で不溶性粒子並びにエアロゾル無しの条件は非常に近い値を取ることがわかった.

これらの変化は界面における状態の変化がもたらすものと考えられ, 本実験からはエアロゾル粒子の可溶性がアスペクト比に大きく寄与することが示唆された. 以上において観測された現象は, 界面活性剤による気液界面におけるスリップ比の増大により気泡が剛体球に近づき, アスペクト比が真球に近づく現象(Tagawa et. al., 2012)と類似しており, 可溶性粒子が界面活性剤のような役割を果たしていることが示唆された.

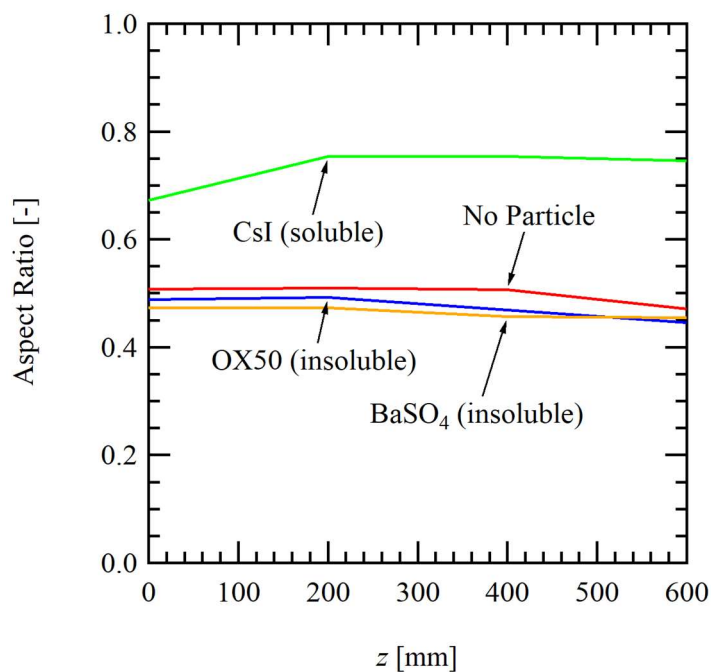


図 3-22 各高さ( $z=0, 200, 400, 600$  mm)におけるエアロゾル条件ごとの平均アスペクト比の比較

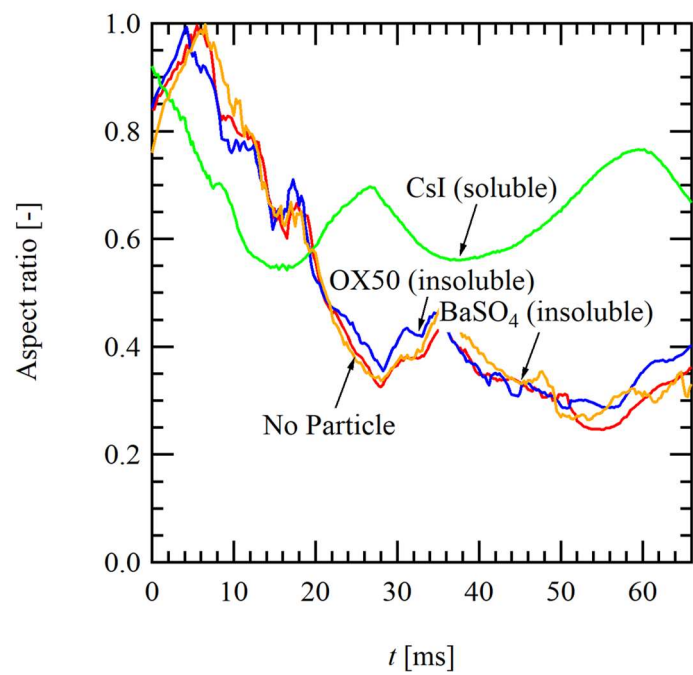


図 3-23 ノズルから離脱後( $z=0$ )から計測したエアロゾルごとのアスペクト比時系列変化の比較

### 3.1.14.3. 各エアロゾル条件における上昇速度

図 3-24 において、各高さ( $z = 0, 200, 400, 600$ )において測定した上昇速度を各エアロゾル条件(エアロゾルなし, ヨウ化セシウム, OX50, 硫酸バリウム)において MELCOR モデルにおいて想定される式, 並びに富山らによる既存の式と比較したものを示す.

時間ステップにおいて計測された上昇速度を  $V_{z,n,e}$ , 各実験におけるステップ数を  $N_e$  として, 三回行った実験値の平均上昇速度を算出した式を以下に示す:

$$\bar{V}_z = \frac{1}{3} \sum_{e=1}^3 \frac{\sum_{n=0}^{N_e} V_{z,n,e}}{N_e} \quad (21)$$

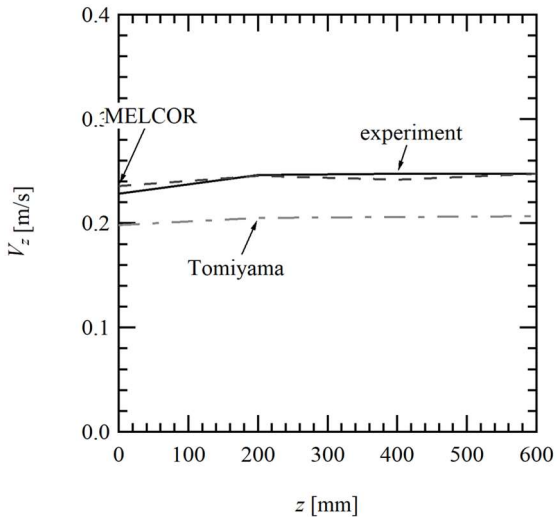
以下に, MELCOR モデルにて想定される上昇速度の式を示す(Zuber et. al., 1965):

$$\begin{aligned} V_z(d \leq 0.5 \text{ cm}) &= 7.87(\gamma/\rho_L)^{1/4} \\ V_z(d > 0.5 \text{ cm}) &= 1.40713V_z(d \leq 0.5 \text{ cm})d^{0.49275} \end{aligned} \quad (22)$$

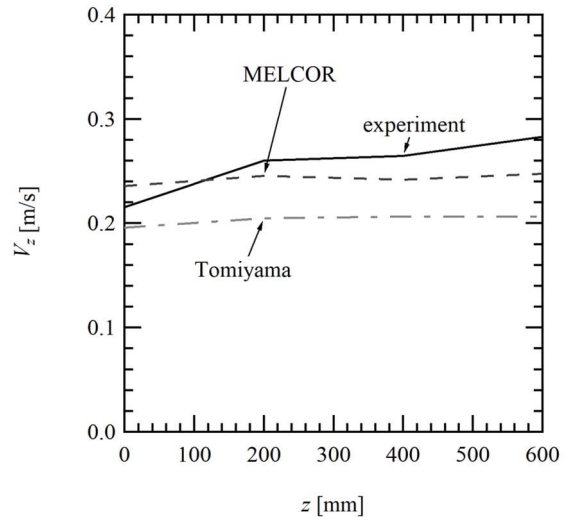
富山らによるアスペクト比を示す式は等価直径  $d$ , 液相密度  $\rho_l$ , 気相密度  $\rho_g$ , 密度比  $\Delta\rho$ , 並びに表面張力  $\sigma$  以下のように表される(Tomiyama et. al., 2002):

$$V_z = \frac{\sin^{-1}\sqrt{1-E^2} - E\sqrt{1-E^2}}{1-E^2} \sqrt{\frac{8\sigma}{\rho_L d} E^{4/3} + \frac{\Delta\rho g d}{2\rho_L} \frac{E^{2/3}}{1-E^2}} \quad (23)$$

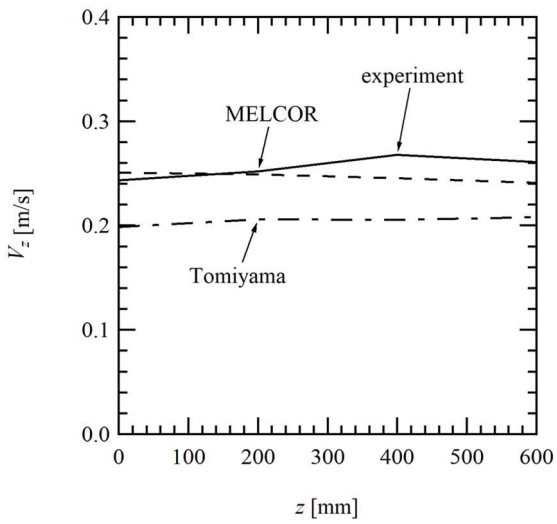
グラフから分かるように OX50, 硫酸バリウムの二条件においては上昇速度の実験値が MELCOR において使用される式を上回る結果が見られた. 上昇速度はノズル出口付近( $z = 0$ )においては小さい値をとっているが, これはノズル離脱直後においては上昇速度が終端速度に達していないからであると考えられる. また, 実験値は全実験領域に渡って富山らの式を上回り, ノズル近傍の一部の条件除いて MELCOR にて使用されるモデルのほうが良い一致を示した.



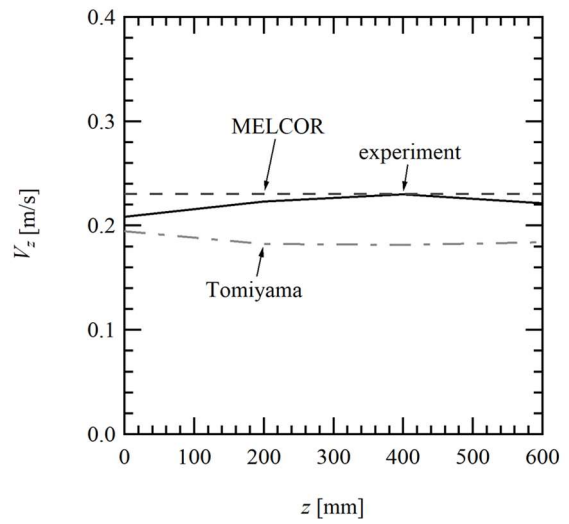
(e) No particle 条件



(f) OX-50 条件



(g) BaSO<sub>4</sub> 条件



(h) CsI 条件

図 3-24 各高さ ( $z = 0, 200, 400, 600$  mm) における平均上昇速度

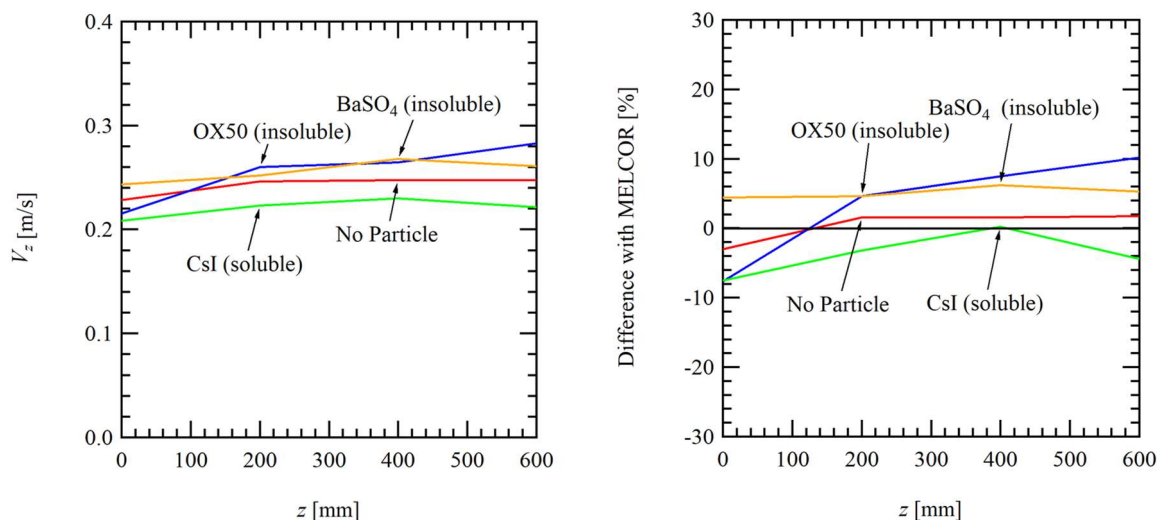
図 3-25(a)に各エアロゾル条件(エアロゾルなし, ヨウ化セシウム, OX50, 硫酸バリウム)ごとの上昇速度の比較を示す. 図から明らかなようにヨウ化セシウム条件においては No Particle 条件よりも低い値を示した一方で, 不溶性粒子(OX50, 硫酸バリウム)条件においては No Particle 条件を上回る結果が得られた.

図 3-25(b)に MELCOR モデルにおける上昇速度と各高さにおける上昇速度の実験値の差を示す. 両式の差は各ステップにおける誤差, 並びに三回の実験の値を組み合わせる以下のように表される:

$$\overline{dV}[\%] = \overline{V}_z \left( \frac{1}{3} \sum_{e=1}^3 \frac{\sum_{n=0}^{N_e} (V_{z,n,e} - V_{r,n,e})}{N_e} \right) \times 100 \quad (24)$$

結果から, 上昇速度は気泡内に粒子がない条件において最も MELCOR モデルと近い値をとり, 不溶性粒子(OX50, 硫酸バリウム)条件においては MELCOR より 5-10%大きな値を, ヨウ化セシウム条件においては最大で 8%ほど小さな値を取る結果が得られた.

上昇速度の実験結果からは上昇速度は可溶性粒子と難溶性粒子, 気泡なし条件の間にアスペクト比ほど大きな差がないものの, 可溶性粒子と難溶性粒子で違う挙動を示すことが確認された. 上昇速度がエアロゾル無しの条件において最も理論値に近づいた理由は元の実験がエアロゾル無しの気泡上昇速度を計測した実験であったためと考えられる. 一方で, 富山らの式を大きく下回った理由としては富山らの式は汚染されていない系における界面活性剤の影響を記述したものであり, 本実験のようなエアロゾルのない場合においても汚染されている系とは異なる結果となったと考えられる.



(a) 上昇速度分布比較

(b) MELCOR モデルからの誤差比較

図 3-25 高さ( $z=0, 200, 400, 600$  mm)におけるエアロゾルごとの上昇速度



### 3.1.15. 単一気泡計測における局所離脱速度の計算

3.1.14 章において行った単一気泡挙動可視化実験を元に、MELCOR モデルにおいて想定される局所離脱速度の計算を行った。本解析の概念図を図 3-26 に示す。以下に示すように局所上昇速度の計算を気泡挙動モデルは実験結果を、内部流動モデルは MELCOR において想定される内部流動モデルを用いてそれぞれ計算を行った。

表 3-7 に本解析で使用した各種パラメータを示す。本解析は粒子径  $d_i = 1 \mu\text{m}$ 、カニングガムスリップ定数としては空気に対する値を用い、平均自由行程は大気圧条件を用いた。

本解析における出力は、遠心力による速度として式(6)、界面における速度として式(7)、速度重力沈降による速度として式(9)、ブラウン拡散による速度として式(10)をそれぞれ使用して計算を行った。

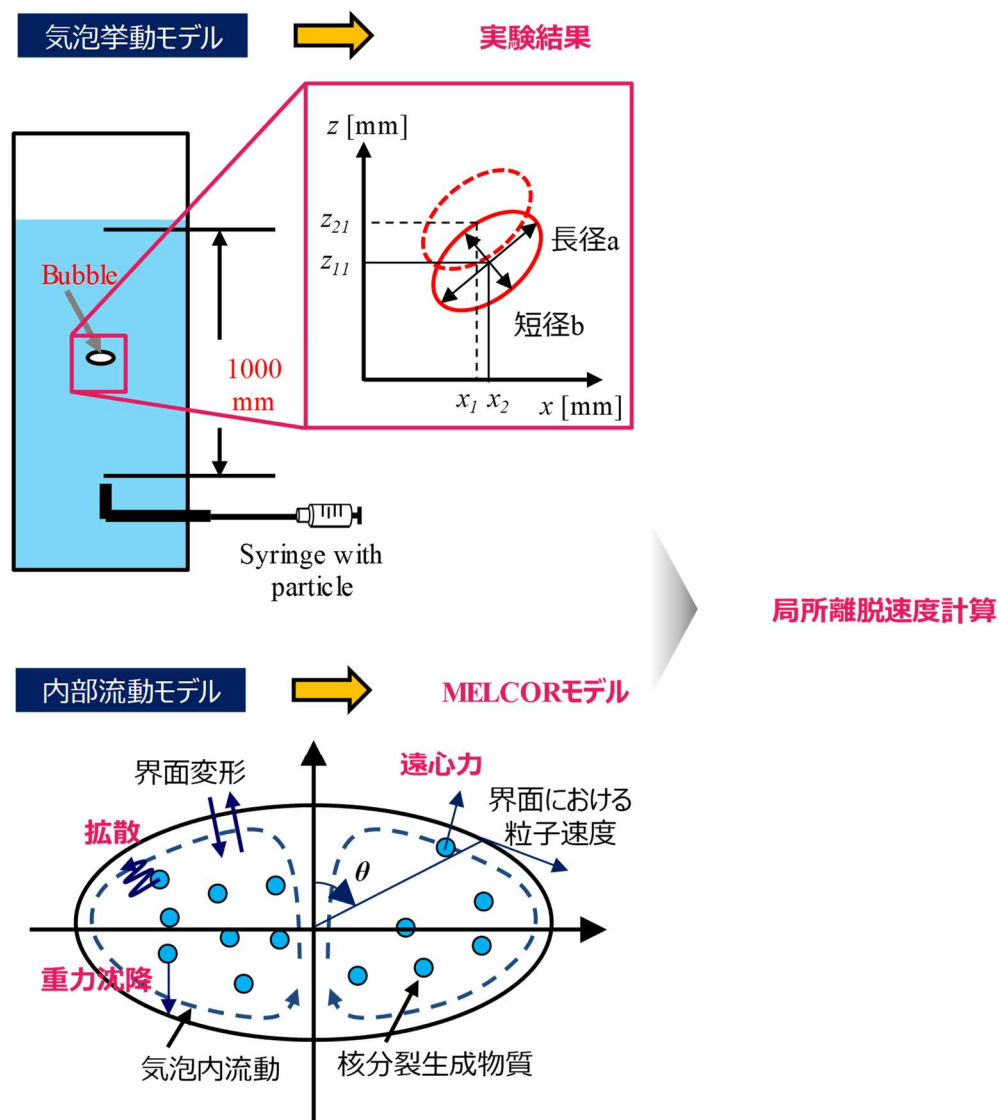


図 3-26 実験データをもとに行った局所上昇速度解析

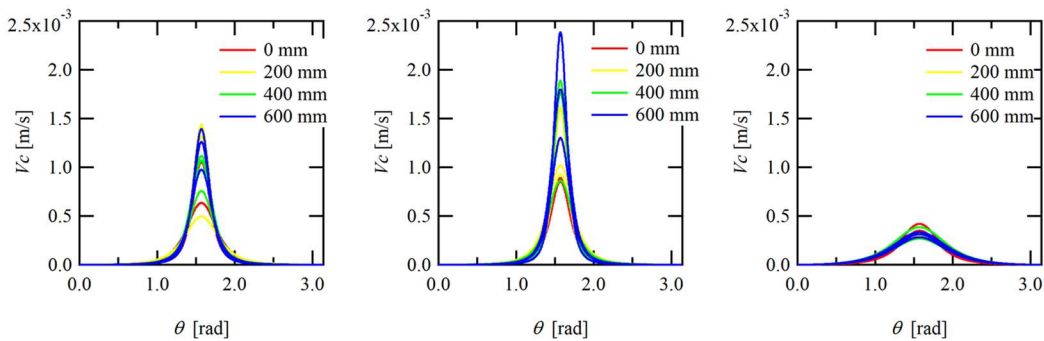
表 3-7 本解析にて使用した各種パラメータ

<b>DF Parameter</b>	
Rising Length [m]	1
<b>Grid Parameter</b>	
Interface Division [-]	200
<b>Physical Parameter</b>	
Gravitational Acceleration [m/s <sup>2</sup> ]	9.81
Boltzmann Constant [m <sup>2</sup> kg/s <sup>2</sup> K]	1.38E-23
<b>Particle Parameter</b>	
Diameter [m]	1.00E-06
Particle Density [kg/m <sup>3</sup> ]	1800
<b>Gas Phase Parameter</b>	
Gas Viscosity [Pa s]	1.82E-05
Gas Density [kg/m <sup>3</sup> ]	1.205
Temperature Inside Bubble [K]	296
<b>Liquid Phase Parameter</b>	
Liquid Density [kg/m <sup>3</sup> ]	998.233
<b>Cunningham Correlation</b>	
Mean Free Path [m]	6.90E-08
A1 [-]	1.257
A2 [-]	0.4
A3 [-]	0.55

本解析結果を以下の図 3-27 に示す. 図 3-27(a)に遠心力による局所離脱速度:  $V_{c,i}$  の計算結果を示す. 遠心力速度は OX50 条件において最大, ヨウ化セシウム条件において顕著に小さい値を取る傾向が見られた. ヨウ化セシウムにおけるこのような傾向が見られた理由として図 3-27(b)に示す界面における局所速度:  $V_s$  の差が挙げられる. アスペクト比が 1 に近く, 真球に近い形を持つヨウ化セシウム条件においては, 流動が高速になる  $\theta = \pi/2$  付近において小さい値をとる.

ブラウン拡散による局所離脱速度  $V_{d,i}$  は図 3-27(c)に示す. 計算結果からはヨウ化セシウム条件が最大になる傾向が見られた. ブラウン拡散は界面更新を考慮した Higbie Penetration Theory (Higbie et al. 1935) が用いられている. 気泡上昇速度が遅く, 界面における局所速度が遅いため, 界面と気泡内部の微粒子の接触時間が長いことから以上のような結果となる.

重力沈降による局所離脱速度  $V_{g,i}$  による速度を図 3-27(d)に示す. 重力沈降による速度は界面における曲率半径の差により, 以上のような結果となる.

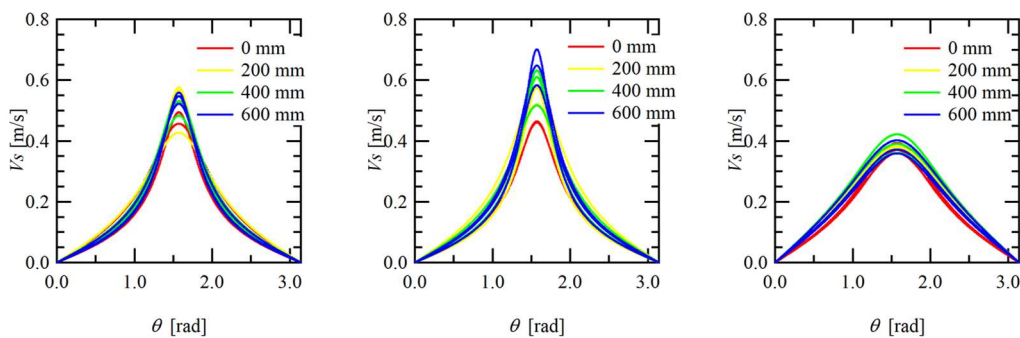


(a-1) No particle 条件

(a-2) OX50 条件

(a-3) CsI 条件

(a) 局所遠心力速度 ( $d_i = 1 \mu\text{m}$ )



(b-1) No particle 条件

(b-2) OX50 条件

(b-3) CsI 条件

(b) 界面流動による速度 ( $d_i = 1 \mu\text{m}$ )

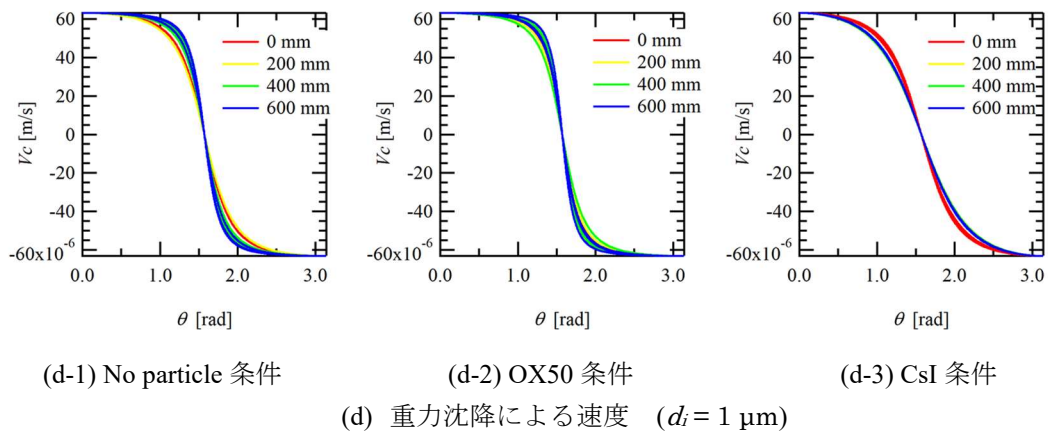
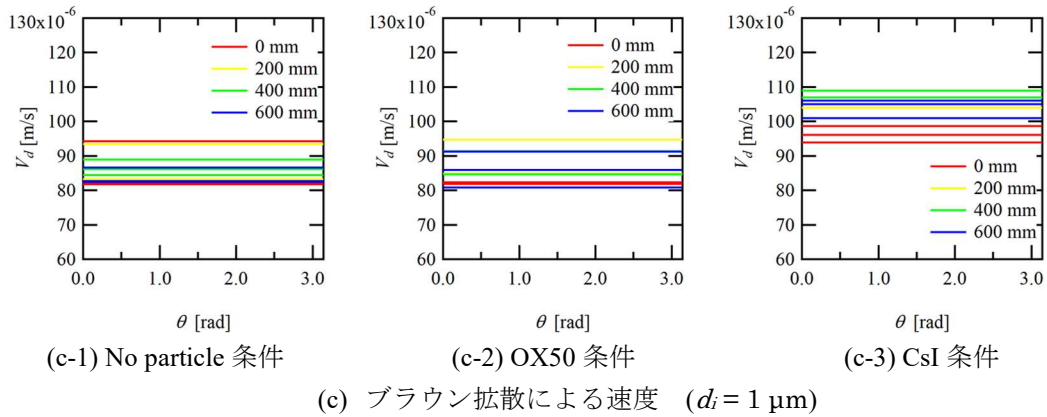
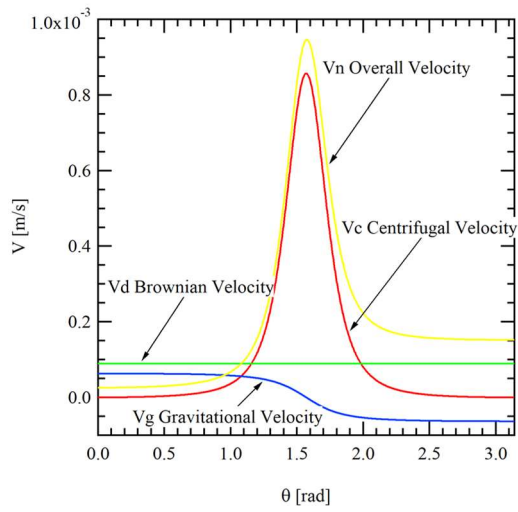
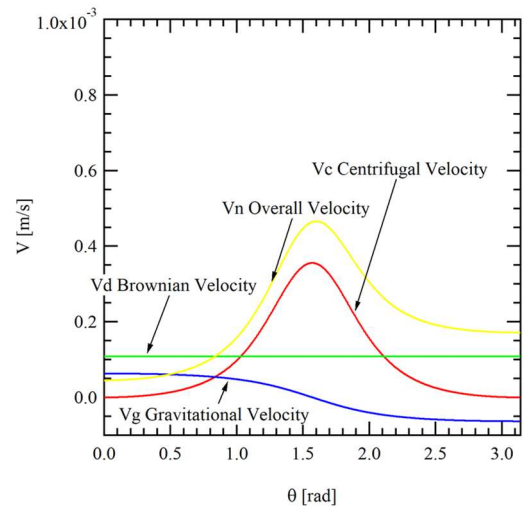


図 3-27 MELCOR 内部流動モデルを用いて計算した局所離脱速度

式(5)に示す界面に向かう局所離脱速度の合計:  $V_{n,j}$ の内訳を図 3-28 に示す. No Particle 条件における界面に向かう速度の合計においては遠心力による局所離脱速度の差が支配的である一方で, ヨウ化セシウム条件においては遠心力による局所離脱速度のみならずブラウン拡散による局所離脱速度も支配的である.



(a) No Particle 条件における速度分布



(b) CsI 条件における速度分布

図 3-28 界面に向かう速度  $V_n$  における速度分布の内訳 ( $d_i = 1 \mu\text{m}$ )

### 3.1.16. 気泡中エアロゾル離脱挙動可視化実験

本実験において使用した単一気泡からのエアロゾル離脱挙動可視化実験の系統図を以下の図 3-29 に示す。本実験においては気泡外部に流出する微粒子を捉えるために一台のカメラ、LED バックライト、シートレーザーを配置した光学系で構成した。実験においてはノズルからの高さとして離脱直後( $z=0$  mm)と定常上昇時( $z=200$  mm)の二つのパラメータを取った。

気泡内部の微粒子は蛍光粒子である FLUOSTAR を用い、レーザーを用いて励起した蛍光光を可視化計測した。

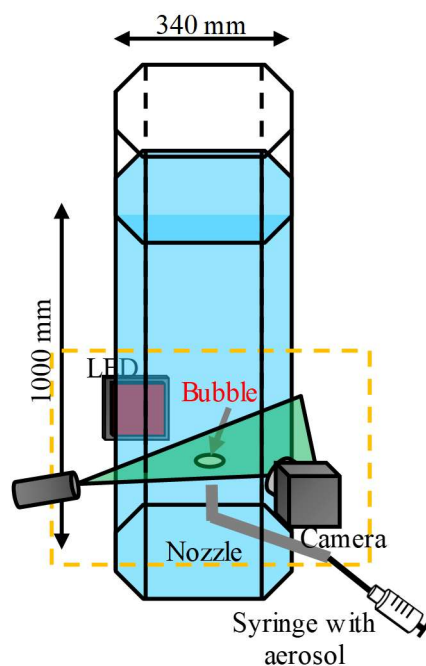


図 3-29 気泡中エアロゾル離脱挙動可視化実験系統図

以下の図 3-30 にノズル離脱直後に気泡から離脱するエアロゾルの可視化結果を示す。撮影条件は 6400 frame/s, シャッタースピード 1/6400 s, 画像のサイズは 1024×1024 pixel となっている。

可視化結果からは気泡が扁平するに従って下部から複数の粒子が一気に離脱するような挙動が確認された。また, PIV 計測の結果から気泡から離脱した微粒子が気泡後流に巻き込まれて上昇するような挙動が確認された。

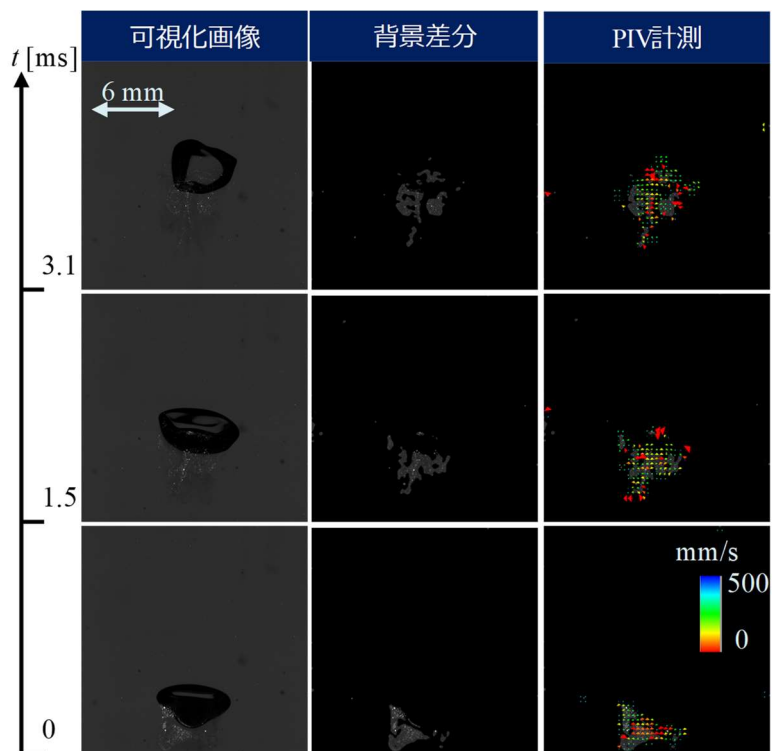
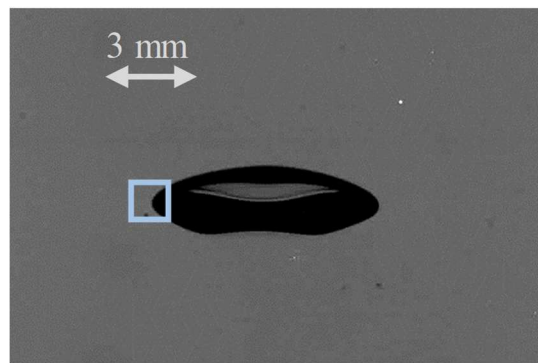


図 3-30 ノズル離脱直後( $z = 0$  mm)における気泡中エアロゾルの離脱

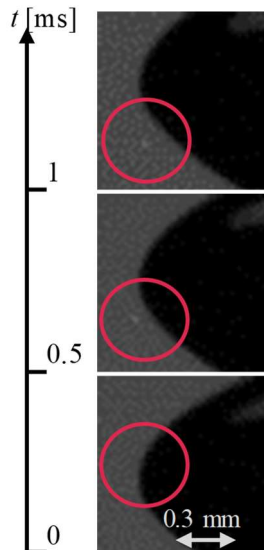
以下の図 3-31 に定常上昇する気泡から離脱するエアロゾルの可視化結果を示す。撮影条件は 6400 frame/s, シャッタースピード 1/6400 s, 画像のサイズは 1024×1024 pixel となっている。

可視化結果からは、図 3-31(b)に示すように気泡の長辺側から単一の粒子が離脱する挙動が確認された。図 3-31(c)気泡の長辺側から離脱した粒子に関して想定される挙動を示す。

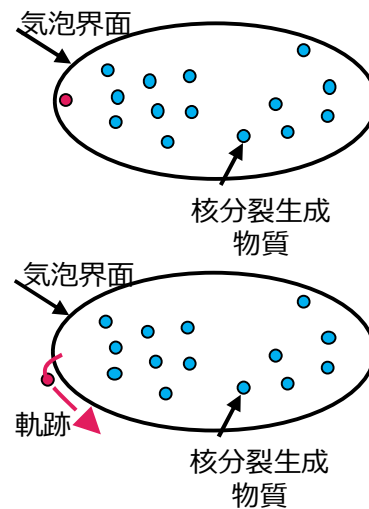
気泡内部に存在する微粒子は内部で旋回運動をしていると想定されており、粒径の大きな微粒子に関しては遠心力における局所離脱速度が支配的であるとされる。図 3-27(a)に示すように気泡内の遠心力は  $\theta = \pi/2$ , つまり気泡の長辺において最大であり、気泡の長辺において界面に向かう速度が最大となるため、長辺において微粒子の離脱が行われることが示唆された。



(a) エアロゾルの含まれた上昇単一気泡挙動 図中の四角は(b)に示す拡大部の範囲



(b) エアロゾル離脱挙動可視化結果



(c) エアロゾル離脱の概念図

図 3-31 定常上昇中単一気泡( $z = 200$  mm)からのエアロゾル離脱挙動



### 3.1.17. 気泡内部流動可視化実験

本実験において使用した気泡内部流動可視化実験の系統図を以下の図 3-9 に示す。本実験においては気泡外部に流出する微粒子を捉えるために一台のカメラ，LED バックライト，拡散光学系によるレーザーを配置した光学系で構成した。実験においてはノズルからの高さとしてノズル直上( $z = 0 \text{ mm}$ )と定常上昇時( $z = 200 \text{ mm}$ )の二つのパラメータを取った。

気泡内部の微粒子は蛍光粒子である FLUOSTAR を用い，レーザーを用いて励起した蛍光光を可視化計測した。

図 3-32 にノズル直上の実験において設定した可視化領域を示す。可視化領域はノズルと水槽底部に焦点が合うよう設定されており，ノズルから液相に射出される気相，並びに微粒子を可視化観測する。

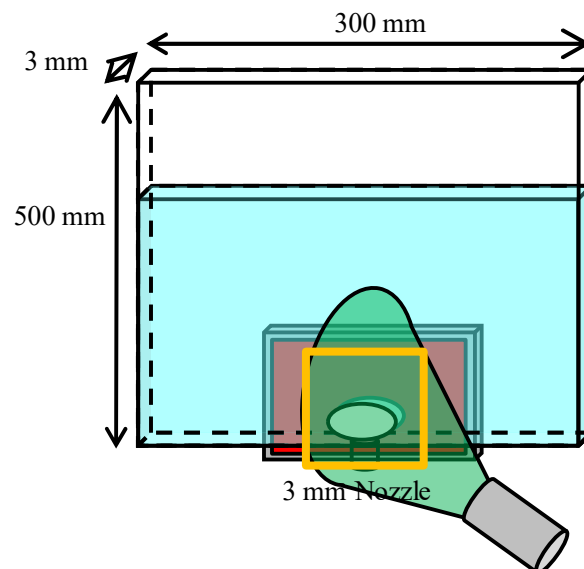


図 3-32 ノズル直上( $z = 0$ )の実験にて設定した可視化領域

図 3-33 にノズル離脱直後の内部流動可視化結果を示す。可視化画像，並びに可視化画像から得られた概念図により，1. 気泡の形成，2. 気泡中への微粒子の噴出，3. ノズル離脱後の気泡界面の下部における捕集の 3 ステップが可視化された。

図 3-34 に粒子塊により生じた界面変形を示す。慣性力の大きな粒子塊の場合，内部の微粒子は図 3-33 における粒子のように界面に当たる前に滞留するのではなく，ノズルから射出された慣性力を保ったまま界面に衝突する。衝突した微粒子は一部が界面に捕集されたものの，凝集した微粒子が分解し，気相内に滞留する挙動が確認された。

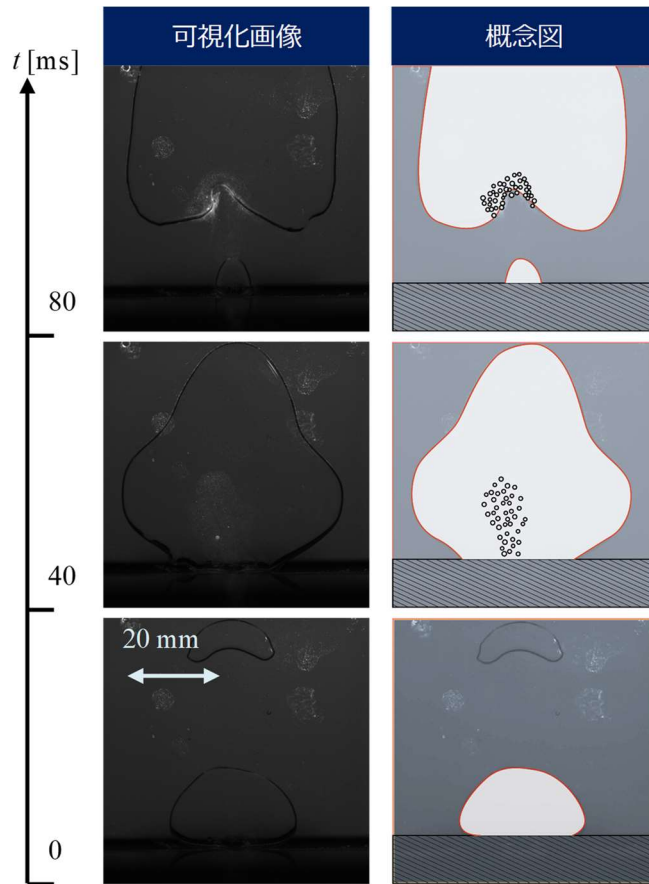


図 3-33 ノズル直上( $z=0$ )の実験における気泡内部流動

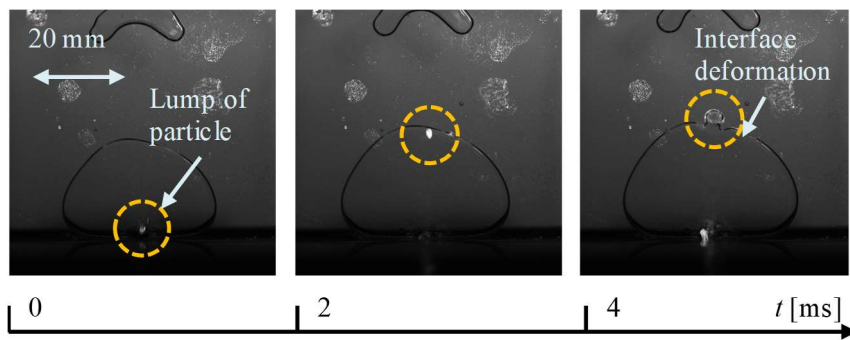


図 3-34 ノズル直上( $z=0$ )の実験における粒子塊による界面変形

図 3-35 に気泡定常上昇時の実験において設定した可視化領域を示す。可視化領域はノズルから離脱した気泡が扁平を終えた部分に設定されており、ノズルから液相に射出される気相、並びに微粒子を可視化観測する。

図 3-36 にエアロゾルを混入した状態で定常上昇する Taylor Bubble を示す。通常の気泡と同様に扁平、揺動などをしながら上昇していく様子が分かる。

図 3-37 においては気泡を一点に留める重心座標一定の画像処理を行い、気泡界面における背景差分を行った。気泡内部の可視化結果においては気泡界面に沿って下降する粒子が目視で確認された。一方で、PIV 結果からわかるように拡散光学系を使用したために気泡奥行方向に存在する全粒子の可視化がなされた。そのため、水槽の壁面に対して静止し、上昇気泡と相対的に下降する壁面の影響が支配的となった。

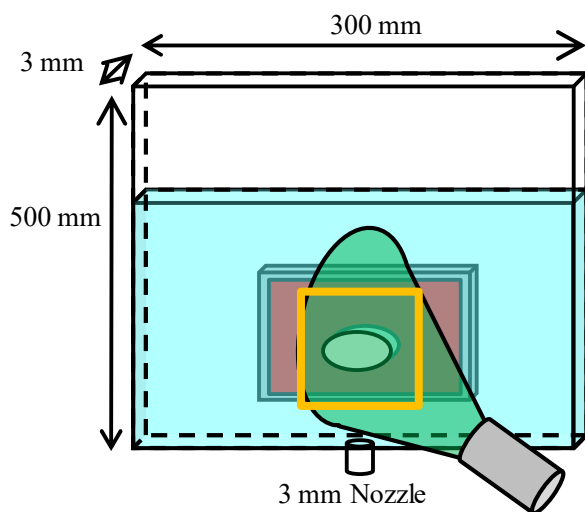


図 3-35 定常上昇する気泡( $z = 100 \text{ mm}$ )にて設定した可視化領域

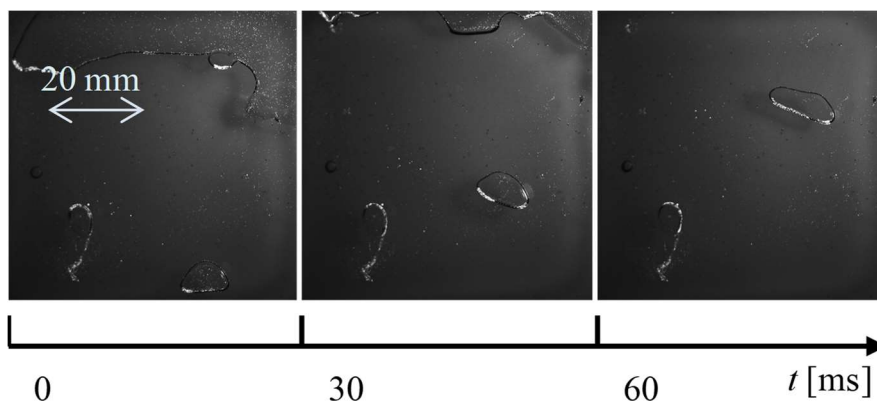


図 3-36 薄型水槽にて撮影した Taylor Bubble

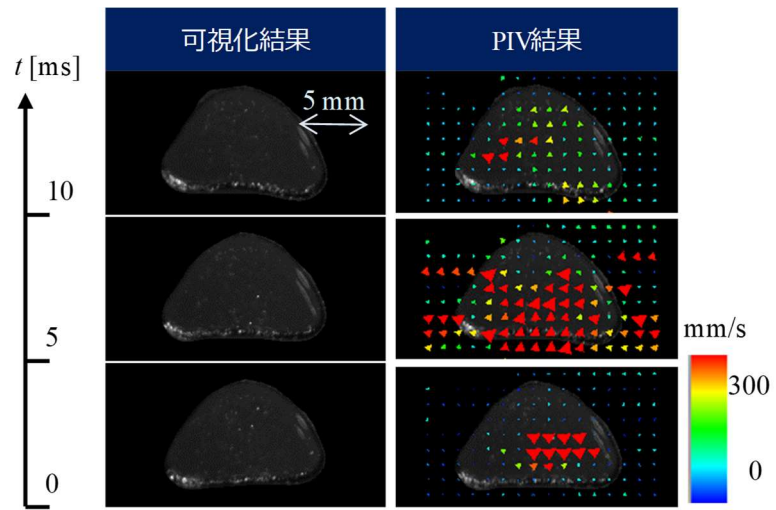


図 3-37 定常上昇する単一気泡内部流動

### 3.1.18. 油滴を用いた内部流動可視化実験

本実験において使用した油滴を用いた内部流動可視化実験の系統図を以下の図 3-38 に示す。本実験においては油滴内部に存在する微粒子を捉えるために一台のカメラ，LED バックライト，シートレーザーを配置した光学系で構成した。実験においてはノズルからの各高さ( $z = 0, 200, 400, 600 \text{ mm}$ )ならびにノズル径( $d_i = 3, 6, 10 \text{ mm}$ )を変更した状態で可視化計測を行った。

油滴にはシリコンオイルを用い，シリンジ内部で FLUOSTAR 粒子と混合攪拌した後，ノズルから射出した。

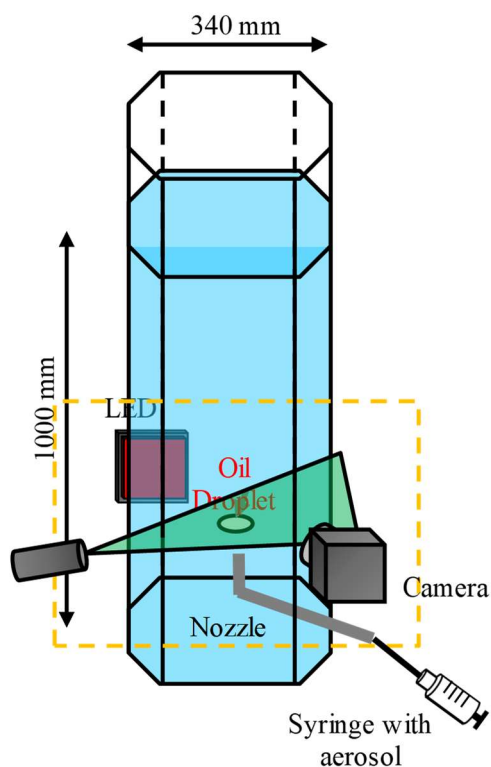


図 3-38 油滴内部流動可視化実験系統図

図 3-39 に油滴内部流動の可視化結果を示す。撮影条件は 5000 frame/s, シャッタースピード 1/5000 s, 画像のサイズは 768×768 pixel となっている。また, ノズルからの高さ:  $z=200$  mm, ノズル径: 10 mm, 油滴等価直径:  $d=10.5$  mm である。

可視化画像からは油滴界面近傍に渡って内部流動全体の可視化がなされていることが分かる。本画像の可視化画像からの状態では背景やの影響で多くのエラーベクトルが確認され, また上昇成分が支配的となり内部の詳細な可視化が出来ない。そこで, 画像処理を用いて油滴重心座標に画像対して座標変換をする画像処理を施すことで PIV 計測を行った。PIV 処理を行った結果からは油滴の内部に特徴的なトロイダル渦構造が確認された。

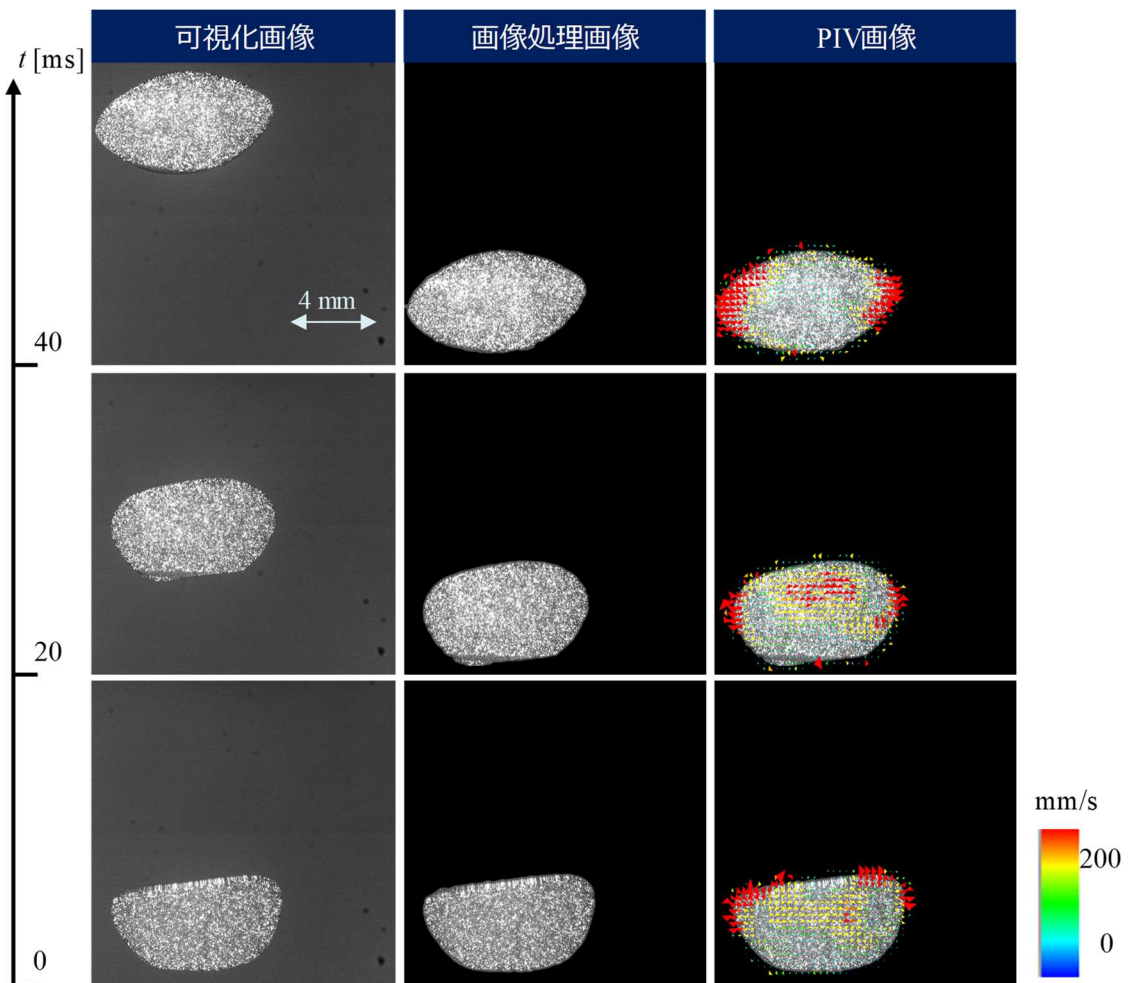
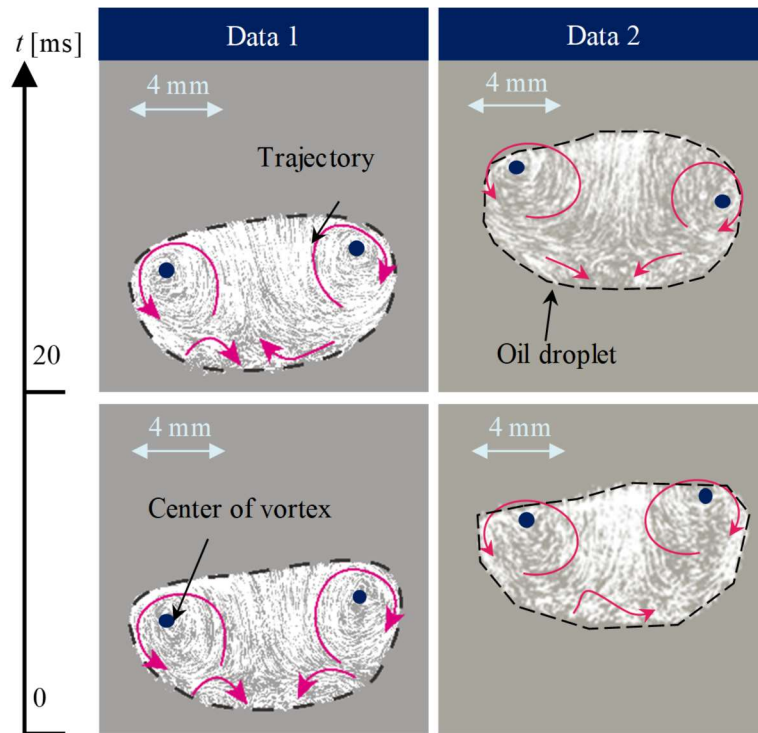


図 3-39 定常上昇する油滴( $z=200$  mm,  $d=10.5$  mm)の内部流動可視化結果

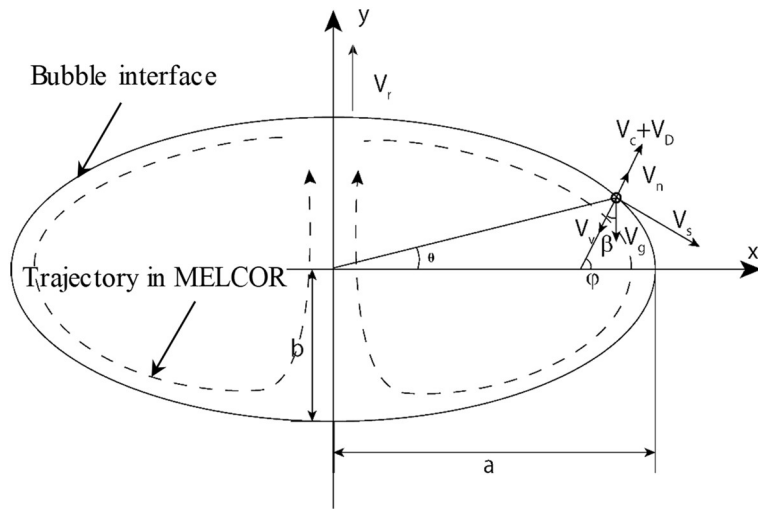
図 3-40 に本実験で観測された油滴内部流動の流跡線を示す。図 3-40(a)においては図 3-39 似て示した画像処理画像を二値化し、100 時間ステップ分合成することで流跡線を取得した。

油滴の可視化画像データからは **Data1**, **Data2** の両方において油滴の上部において一軸のトロイダル渦構造が確認された。また、**Data2** のように上部の渦構造も油滴の揺動に合わせて渦中心の位置が変化していく様子が可視化された。一方で、油滴の下部においては流入や流出など過渡的な流動が観測された。

図 3-39(a)において得られた可視化結果を図 3-39(b)に示す MELCOR モデルにおいて想定される気泡内流動構造と比較を行うと油滴の上部においては MELCOR にて想定しているのと同様の渦構造を確認した一方で、油滴の下部においては従来のモデルが想定していない流動の過渡的な変化を観測した。また、上部の渦構造に関しても渦中心が移動するなど必ずしも定常的ではない事を確認した。これら MELCOR モデルとの相違点は MELCOR にて想定されていない界面の揺動によって生じているものと考えられる。



(a) 油滴内部にて観測された内部流動の流跡線



(b) MELCOR モデルにおいて想定される内部流動の流跡線

図 3-40 実験にて観測された内部流動の流跡線と MELCOR にて想定される流跡線の比較



図 3-41 にノズル離脱直後( $z = 0$  mm), ノズル径 3 mm における油滴内画像の可視化結果を示す. 撮影条件は 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 である. 可視化結果に対して図 3-39 において使用した画像処理を用い油滴中心の座標系に座標変換を行った画像に対して PIV 処理をかけた.

可視化結果からはノズル離脱後の油滴下部から扁平に伴い上向きの流動が発達していく様子を可視化した. 得られた可視化結果から油滴の中心軸上における  $z$  方向流速の時間変化( $t = 0, 0.013, 0.025$  s)を表したグラフを図 3-42 に示す. グラフからは速度のピークが油滴の下部から上部に遷移しており, 時間と共にピークが上昇していくことが分かる.

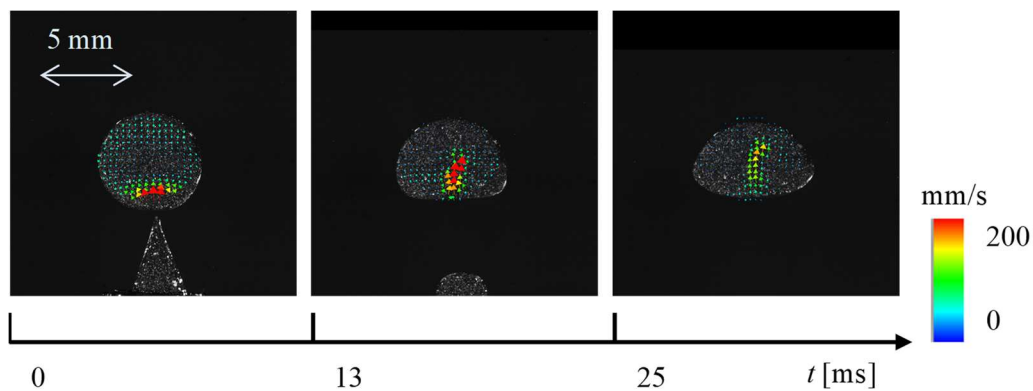


図 3-41 ノズル離脱直後( $z = 0$  mm)における油滴内部流動の可視化画像

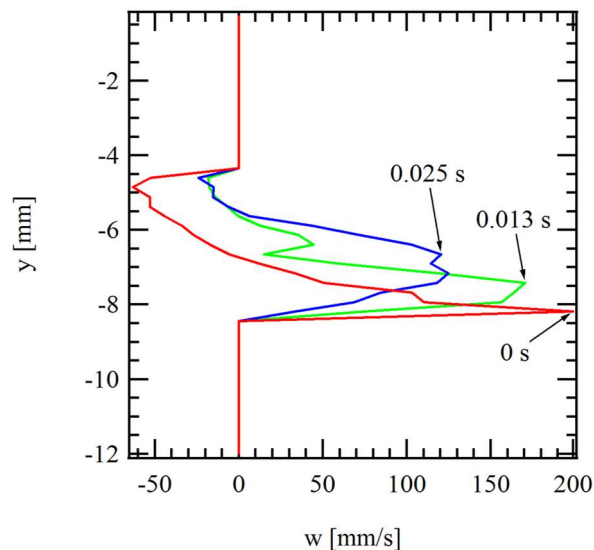


図 3-42 ノズル離脱直後の油滴( $z = 0$ )の中心軸上での各時間( $t = 0, 0.013, 0.025$  s)における  $z$  方向速度分布

図 3-43 に各ノズル位置からの高さ( $z = 0, 200, 400, 600$  mm), 各油滴等価直径( $d = 4.3, 8.1, 10.7$  mm)における油滴内部流動の可視化結果を示す. 撮影条件は 4000 frame/s, シャッタスピード 1/4000 s, 画像のサイズは 1024×1024 pixel となっている.

油滴の等価直径を変更するため, 各油滴径に対して, それぞれ別々の直径を持つノズル(3, 6, 10 mm)から油滴の射出を行った. 可視化結果を基に図 3-39 と同様の画像処理を行い, PIV を行うことで内部の速度場を計測した.

油滴内部計測結果から, 上昇するに従って内部の流動が変化して様子が見られた. これらの変化は油滴がノズルから離脱した直後においては図 3-42 のように扁平と共に油滴下部から流動が発達していくものの, 油滴が上昇するにしたがって界面の揺動などの影響で徐々に流動が遷移していくことが確認された.

図 3-44 に各ノズルからの高さ( $z = 0, 200, 400, 600$  mm), 各油滴等価直径( $d = 4.3, 8.1, 10.7$  mm)における油滴内部流速絶対値の平均値を  $N$  を可視化領域内の 0 でない速度ベクトルの数,  $V_n$  を可視化領域内の 0 以外の各速度ベクトルとして, 以下の式のように求める.

$$\bar{V} = \left| \frac{\sum_{n=0}^N V_n}{N} \right| \quad (25)$$

各位置における速度の平均値は等価直径:  $d = 4.3, 8.1$  mm は  $z = 0$  においては  $\bar{V}$  が大きい値をとるものの, よりノズルから離れた領域( $z = 200, 400, 600$  mm)において値が減衰していくことがわかった. また, 等価直径:  $d = 10.7$  mm においては  $z = 0$  においては等価直径:  $d = 4.3, 8.1$  mm における値とほぼ同じである一方で減衰は高さ:  $z = 200$  mm でも進行せず, 減衰した後の高さ:  $z = 400, 600$  mm においても等価直径:  $d = 4.3, 8.1$  mm よりも高い値を取ることが分かる.

これらの内部流動の変化は等価直径:  $d = 10.7$  mm の油滴のみ等価直径が大きく, 揺動の影響が大きいことによって起こるものであると考えられる.

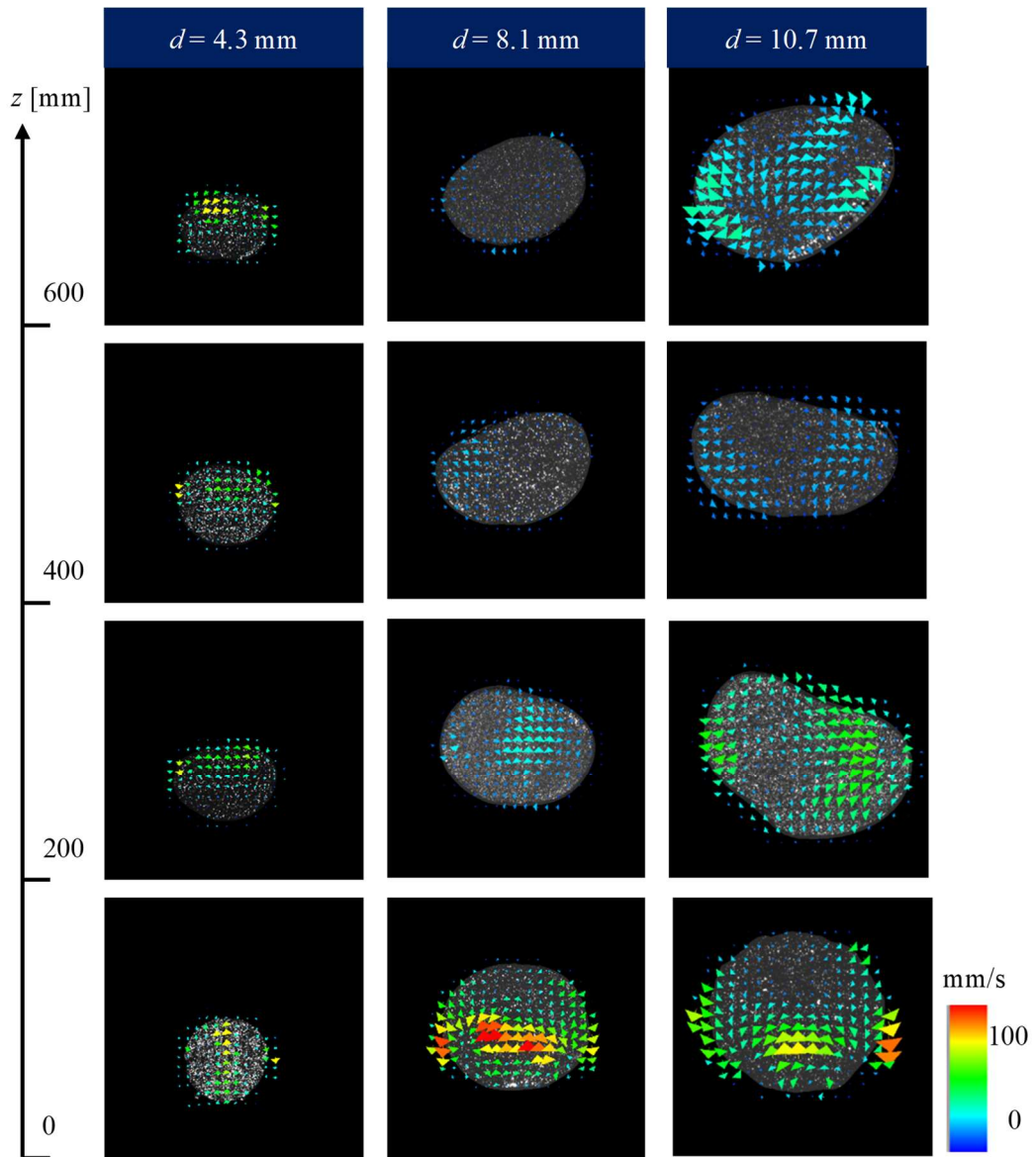


図 3-43 各ノズル高さ( $z = 0, 200, 400, 600 \text{ mm}$ )における  
油滴等価直径ごとの内部流速可視化結果

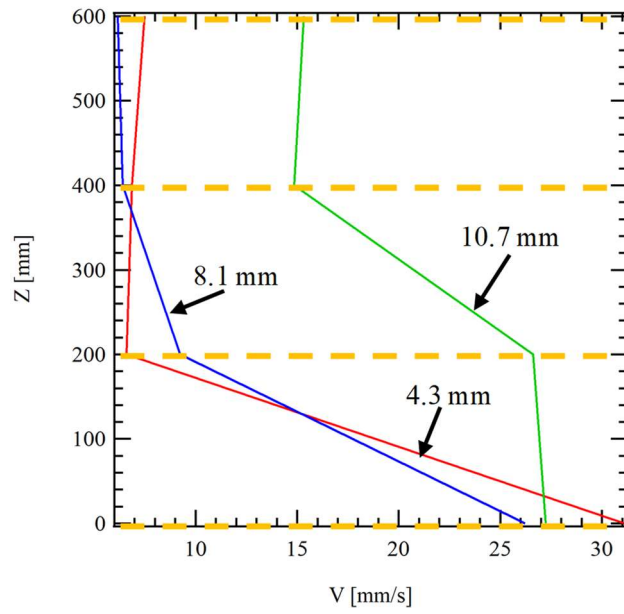


図 3-44 各高さ位置( $z = 0, 200, 400, 600$  mm)における油滴等価直径ごとの油滴内部流速の絶対値の平均値

図 3-39 にて示した油滴の可視化, PIV 画像においては油滴内における流動や流跡線を可視化, MELCOR モデルと比較を行った. しかしながら, 実際の MELCOR モデルにおける計測においては内部の流動全体が計算されているわけではなく油滴の界面における速度のみが考慮されている. そこで, PIV と気泡の界面検出を組み合わせることで界面速度の検出を行った.

図 3-45 に画像処理と PIV 計測を組み合わせた油滴界面速度検出手法を示す. 油滴に対して PIV 計測を行った画像は油滴内部全体に渡って速度ベクトルの情報を保存している. 一方で, PIV は仕組み上一画素ごとに速度場計測を行うのではなく, ある定められたグリッドで計測を行う. そこで, 元画像に対して PIV 処理を行うグリッドと同じ解像度まで落とす処理を施し, 二値化, 界面計測を行う. ここで, 界面と検出されたセルと, PIV 処理の結果と整合を取ることによって, 界面の速度分布のみを取得する.

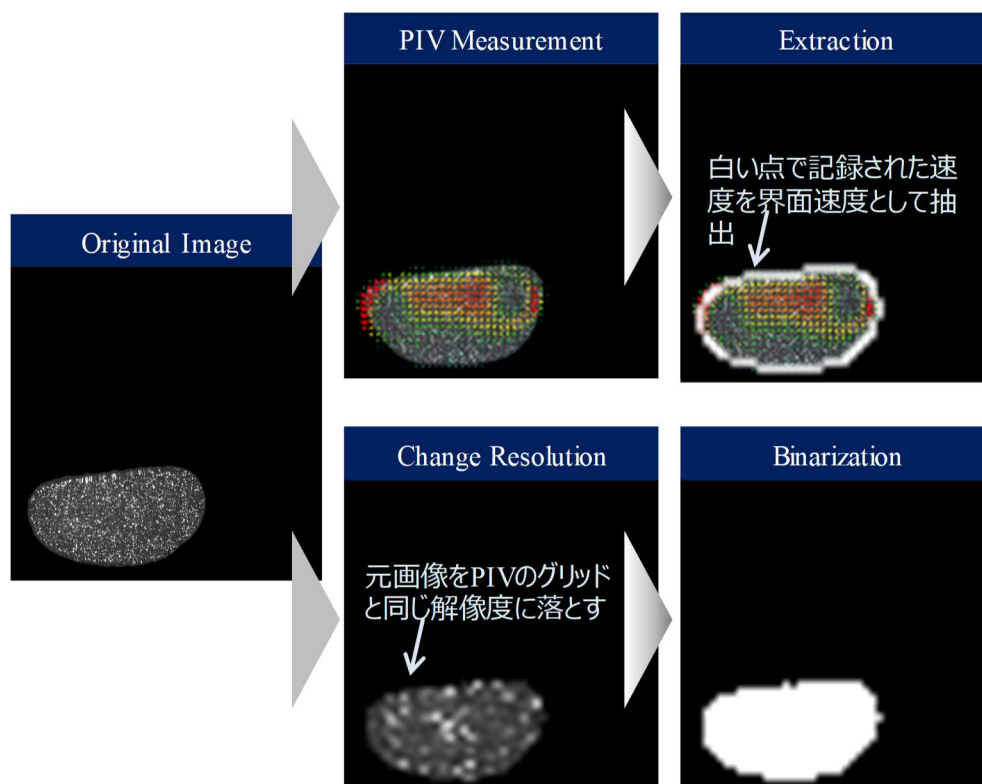


図 3-45 油滴界面速度検出方法

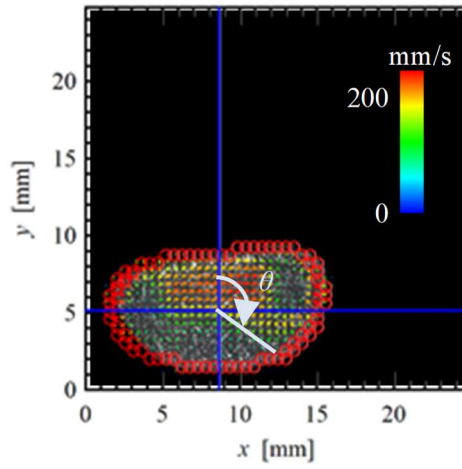
図 3-45 において説明した手法にて、図 3-46 にて界面における速度と MELCOR モデルにて示す理論値の比較を示す。図 3-46(a)に実際に界面速度検出に用いたデータ、並びに偏角  $\theta$  の定義を示す。角度の中心としては油滴の重心座標を取り、界面と検出された点は赤丸にて示されている。

図 3-46(b)に検出された界面における局所速度  $V_s$  と MELCOR モデルにおける理論値を比較したグラフを示す。横軸には偏角  $\theta$ 、縦軸にはそれぞれの偏角における局所界面速度  $V_s$  に対して式(7)を用いて計算した。なお、物性値などのパラメータに関しては表 3-6 に示す水・シリコンオイル系に FLUOSTAR 粒子を使用した値を使用した。

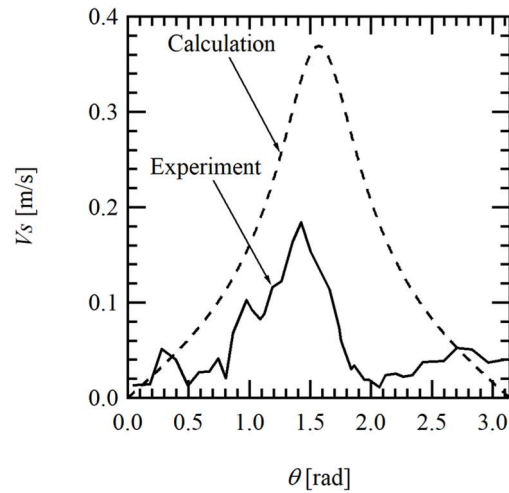
実験結果からは気泡の内部において定性的には偏角:  $\theta = 2/\pi$  において最大値をとるなど内部における流速の分布が一致した一方で、界面における速度が一貫して理論値を下回ったことで、油液界面におけるスリップ比が内部の流速に影響を与えることが確認された。

図 3-46(b)における界面における局所速度は油滴の内部における流動を知る上で重要なパラメータである一方で界面に対して接線方向の流動であるため微粒子の離脱挙動に直接関わるわけではない。そこで、図 3-46(c)において界面速度から生じる旋回運動による遠心力による局所離脱速度  $V_{e,i}$  の計算結果を示す。横軸には偏角  $\theta$ 、縦軸にはそれぞれの偏角における遠心力による局所離脱速度  $V_{e,i}$  に対して式(6)を用いて計算した。

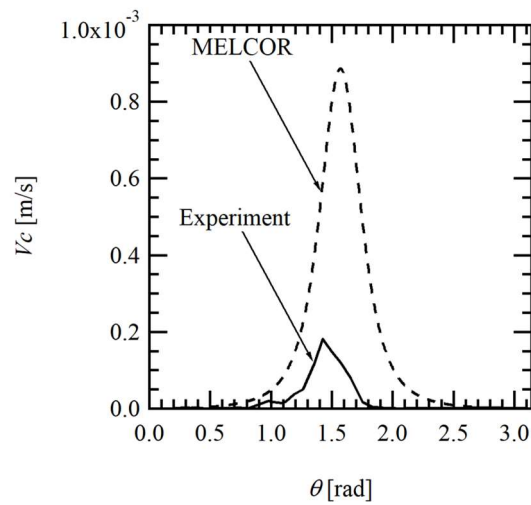
計算結果から油液界面におけるスリップ比により、図 3-28 のように  $1\ \mu\text{m}$  以上の微粒子に大きな影響を与える遠心力による局所離脱速度が小さい値を取ることが見て取れる。以上の結果からスリップ比が DF に対して大きな影響を与えることが示唆された。



(a) 界面速度抽出に使用したデータ( $d = 10.5$  mm) 赤丸は界面速度と検出した点



(b) MELCOR にて計算した界面速度( $V_s$ )と実験値の比較



(c) MELCOR にて計算した遠心力による速度( $V_c$ )と実験値の比較

図 3-46 界面における速度と MELCOR モデルの比較

### 3.1.19. Mach-Zehender 干渉計を用いた実験

Mach Zehender 干渉計の実験においては 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。

そこで、昨年度構成した図 3-47 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。原因としては光路長合わせのため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。

Mach-Zehender 干渉計の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 3-48 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。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。

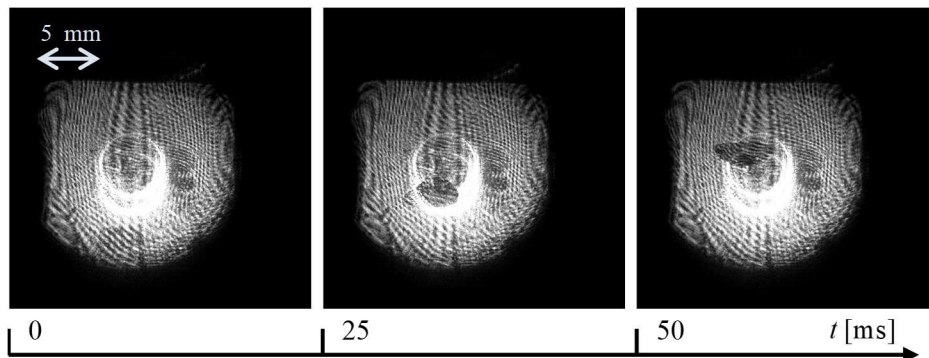


図 3-47 光学系によって生じた干渉縞

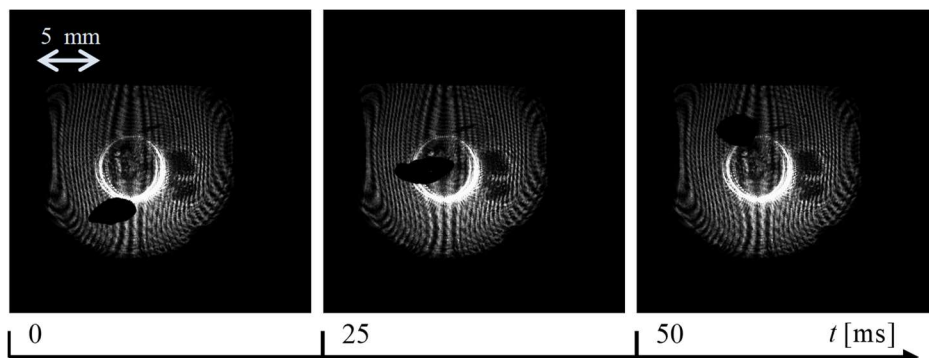


図 3-48 片側の光路のみで発生した干渉縞



そこで、反射対策を十分に施し、ミラーとハーフミラーを組み合わせた構造を持つ図 3-11(b) に示すプリズムタイプの Mach-Zehender 光学系を設備し、実験を行った。図 3-49 図 3-47 に示すのは撮影された二波超干渉計による干渉縞の画像である。画像の撮影は 6400 frame/s, シャッタースピード 1/6400 s, 画像のサイズは 1024×1024 pixel で行った。

撮影結果からは 630 nm, 532 nm のそれぞれの条件において干渉縞が出来ており、光軸のズレや光学系内部反射の影響は確認されなかった。

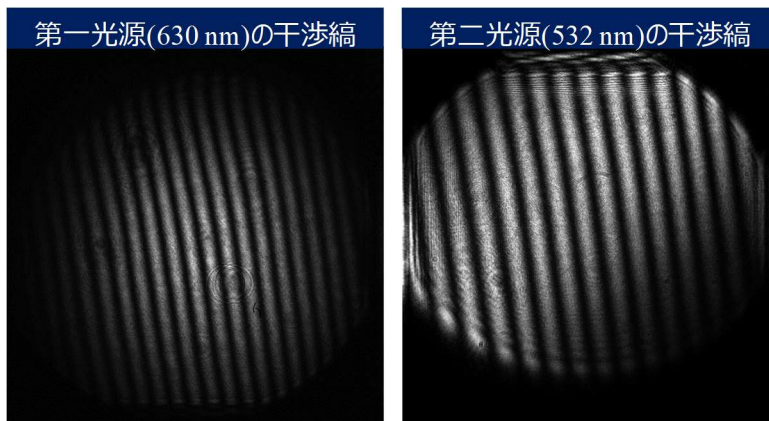


図 3-49 二波長干渉計により得られた干渉縞

### 3.1.20. 単一気泡実験のまとめ

単一気泡挙動可視化実験においては以下の結果が得られた

- ・ 可視化結果から、全領域においてヨウ化セシウム条件のみ扁平が小さく、より真球に近い形状を取る。全ての条件において気泡射出直後( $z = 0$  mm)はノズルの影響により扁平が小さい領域が見られたものの、気泡が上昇した領域( $z = 200, 400, 600$  mm)の領域においては特に大きな変化は見られなかった。
- ・ エアロゾルなし、OX50、硫酸バリウムの三条件においてはアスペクト比の実験値が MELCOR、並びに Wellek らの式を共に下回る結果が得られた。一方で、ヨウ化セシウム条件においては Wellek らの式、並びに MELCOR の式と近い値を示し、特に MELCOR モデルにおいて想定される式と良い一致を示した。
- ・ ヨウ化セシウム条件のみアスペクト比発振の幅が小さいこと、また一方で不溶性粒子並びにエアロゾル無しの条件はアスペクト比に近い値を取る。これらの変化は界面における状態の変化をもたらすものと考えられ、本実験からはエアロゾル粒子の可溶性がアスペクト比に大きく寄与することが示唆された。以上より可溶性粒子が界面活性剤のような役割を果たしていることが示唆された。
- ・ OX50、硫酸バリウムの二条件においては上昇速度の実験値が MELCOR において使用される式を上回る結果が見られた。実験値は全実験領域において富山らの式を上回り、ノズル近傍の一部の条件を覗いて MELCOR にて使用されるモデルのほうが良い一致を示した。
- ・ 上昇速度は気泡内に粒子がない条件において最も MELCOR モデルに近い値をとり、不溶性粒子(OX50、硫酸バリウム)条件においては MELCOR より 5-10 % 大きな値を、ヨウ化セシウム条件においては最大で 8 % ほど小さな値を取る結果が得られた。
- ・ 上昇速度がエアロゾル無しの条件において最も MELCOR モデルにおける値に近づいた理由は元の実験がエアロゾル無しの気泡上昇速度を計測した実験であったためと考えられる。一方で、富山らの式を大きく下回った理由としては富山らの式は汚染されていない系における界面活性剤の影響を記述したものであり、本実験のようなエアロゾルのない場合においても汚染されている系とは異なる結果となったと考えられる。

単一気泡計測における局所離脱速度の計算から以下の結果が得られた

- ・ 遠心力速度は OX50 条件において最大、ヨウ化セシウム条件において顕著に小さい値を取る傾向が見られた。ヨウ化セシウムにおけるこのような傾向が見られた理由としては界面流動による速度:  $V_S$  の差が挙げられる。
- ・ ブラウン拡散による局所離脱速度  $V_{di}$  は計算結果からヨウ化セシウム条件が最大になる傾向が見られた。気泡上昇速度が遅く、界面における局所速度が遅いことから界面と気泡内部の微粒子の接触時間が長いことかため以上のような結果となる。
- ・ 界面に向かう局所離脱速度の合計:  $V_{nj}$  の内訳は No Particle 条件における界面においては遠心力による局所離脱速度の差が支配的である一方で、ヨウ化セシウムにおいては遠心力による局所離脱速度のみならずブラウン拡散による局所離脱速度も支配的である。

気泡中エアロゾル離脱挙動可視化実験から以下のような結果が得られた

- ・ ノズル離脱直後における気泡の可視化結果からは気泡が扁平するに従って下部から複数の粒子が一気に離脱するような挙動が確認された。また、PIV 計測の結果から気泡から離脱した微粒子が気泡後流に巻き込まれて上昇するような挙動が確認された。
- ・ 定常上昇する気泡から離脱するエアロゾルの可視化結果からは、気泡の長辺側から単一の粒子が離脱する挙動が確認された。気泡内部に存在する微粒子は内部で旋回運動をしていると想定されており、気泡内の遠心力による局所離脱速度は曲率半径が最小となる  $\theta = \pi/2$ 、つまり気泡の長辺において最大であり、気泡の長辺において界面に向かう局所離脱速度が最大となるため、長辺において微粒子の離脱が行われることが示唆された。

気泡中エアロゾル離脱挙動可視化実験から以下のような結果が得られた

- ・ ノズル離脱直後の内部流動可視化結果から、1. 気泡の形成、2. 気泡中への微粒子の噴出、3. ノズル離脱後の気泡界面の下部における捕集の 3 ステップが可視化された。
- ・ 粒子塊による界面変形が可視化された。慣性力の大きな粒子塊の場合、内部の微粒子は通常の粒子のように界面に当たる前に滞留するのではなく、ノズルから射出された慣性力を保ったまま界面に衝突する。衝突した微粒子は一部が界面に捕集されたものの、凝集した微粒子が分解し、気相内に滞留する挙動が確認された。
- ・ 定常上昇時の気泡内部の可視化結果においては気泡界面に沿って下降する粒子が目視で確認された。一方で、PIV 結果からわかるように拡散光学系を使用したために気泡奥行方向に存在する全粒子の可視化がなされた。そのため、PIV においては水槽の壁面に対して静止し、上昇気泡と相対的に下降する壁面の影響が支配的となった。

油滴を用いた内部流動可視化実験から以下のような結果が得られた

- 各ノズル位置からの高さ( $z = 0, 200, 400, 600$  mm), 各油滴等価直径( $d = 4.3, 8.1, 10.7$  mm)における油滴内部流動の可視化結果から, 油滴が上昇するにしたがって界面の揺動などの影響で徐々に流動が遷移していくことが確認された.
- 等価直径: $d = 4.3, 8.1$  mm は  $z = 0$  においては $\bar{v}$ が大きい値をとるものの, よりノズルから離れた領域( $z = 200, 400, 600$  mm)において減衰していく. また, 等価直径: $d = 10.7$  mm において減衰は高さ: $z = 200$  mm でも進行せず, 減衰した後の高さ: $z = 400, 600$  mm においても等価直径: $d = 4.3, 8.1$  mm よりも高い値を取ることが分かる. これらの内部流動の変化は等価直径: $d = 10.7$  mm の油滴のみ等価直径が大きく, 揺動の影響が大きいことによって起こるものであると示唆された.
- PIV と気泡の界面検出を組み合わせることで界面速度の検出を行う方法を開発した.
- 気泡界面速度の実験結果からは気泡の内部において定性的には偏角: $\theta = 2/\pi$  において最大値をとるなど内部における流速の分布が一致した一方で, 界面における速度が一貫して理論値を下回ったことで, 油液界面におけるスリップ比が内部の流速に影響を与えることが確認された.
- 遠心力による速度の計算結果から油液界面におけるスリップ比により, 粒径  $d_i = 1$   $\mu\text{m}$  以上の微粒子に大きな影響を与える遠心力速度が小さい値を取ることが見て取れる. 以上の結果からスリップ比が DF に対して大きな影響を与えることが示唆された.

Mach-Zehender 干渉計を用いた実験から以下の結果が得られた

- ミラーとハーフミラーを組み合わせた構造を持つプリズムタイプの Mach-Zehender 光学系を設備し撮影結果からは 630 nm, 532 nm のそれぞれの条件において干渉縞を撮影した. 光軸のズレや光学系内部反射の影響は確認されなかった.

### 3.2. 気泡の二相流挙動評価実験装置の設計製作及び実験実施

エアロゾルを含まない二相流挙動の把握のため、実機相当を含む幅広い条件におけるガス噴出から液面到達までの break up, 気泡上昇過程などの気泡挙動を詳細に把握する。さらに流動状況を分類し整理して、特徴的な気泡塊の挙動及びその領域を特定する。本実験では、プールスクラビング時の二相流挙動の把握のため、エアロゾル無し及び有りの条件においてプール中にガスを連続的に噴出させることで、実際のプールスクラビングと同等の条件の下で多数の気泡が上昇する際の二相流動様式を同定するとともに、ボイド率、界面積濃度、気泡の合体・分裂などの特徴的な流動及び気泡形状、気泡径分布、気泡塊の平均上昇速度などの気泡挙動特性、さらにそれらとエアロゾル挙動の計測及び分類を行う。表 3-8 に実験の基本仕様を、図 3-50 に試験部の概念図、図 3-51 に系統図を示す。図に示すように、水を溜めた試験部容器内に実機相当条件を模擬したガスを流入させる。ガスの上昇過程における二相流動の変化を、高速度カメラやボイド率測定装置等を用いて計測する。具体的な計測項目は表 3-8 に示す。今年度は、昨年度までに製作した実験装置を用い、噴流部から水面での放出過程に至るまでの二相流動様式ごとに二相流動の更なる高精度な計測を行う。また、ガス流量やサブマージェンス等のパラメータを変化させ、試験部出入口におけるエアロゾル計測を行うことで、エアロゾル除去効果を支配する二相流動様式やメカニズムを検討する。さらに、界面変動等に起因するエアロゾル除去効果について、単一気泡実験で整理したパラメータ等を用いて二相流動様式に応じたモデル化の方法を検討し、単一気泡を対象に検討したモデル化手法を改良する。

表 3-8 気泡の二相流挙動評価試験基本仕様

項目	内容	備考
装置構成	実験部容器, コンプレッサあるいは窒素ボンベ, ボイラ等	
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.
実験条件	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	
実験パラメータ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ガス噴出し方向: 下, 横, 上</li> <li>・穴形状: 円 (基本), 破損口形状 (適宜, 理想化)</li> <li>・口径: 3 種類 (クエンチャ, ベント管を模擬し, スケーリング則を考慮して寸法決定)</li> </ul>	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

	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ガス流出速度: 単気泡相当の流速条件+<math>\alpha</math>~十分に大きな速度範囲</li> <li>・非凝縮性ガス濃度: 0~100%</li> <li>・サブクール度: 液温が常温から飽和温度近までの範囲 (高さ方向に大きな温度勾配を設定する実験条件も含む)</li> <li>・サブマージェンス: 100mm~2000mm</li> </ul>	<p>討する.</p>
計測項目	<ul style="list-style-type: none"> <li>・気泡の径, 扁平率などの界面形状及び周囲流速の分布</li> <li>・気泡塊 (クラスタ又はプルーム) の平均上昇速度, 気泡間の距離及び流速差の分布等</li> <li>・3次元ボイド率分布又は複数の代表断面内における2次元ボイド率分布</li> <li>・界面積濃度分布</li> <li>・界面又は液面から発生する液滴の径及び速度の分布</li> <li>・流出ガス噴流から上昇スウォームに至るまでの二相流流動様式の特定及び合体・分裂挙動の把握のための可視化情報</li> <li>・流動様式の異なる流れ領域における気泡の合体・分裂挙動, 界面の変形に関わる周波数及び振幅, 大気泡の発生頻度及び体積割合等</li> <li>・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)</li> <li>・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)</li> </ul>	<p>気泡流れの流動様式ごとに整理</p>

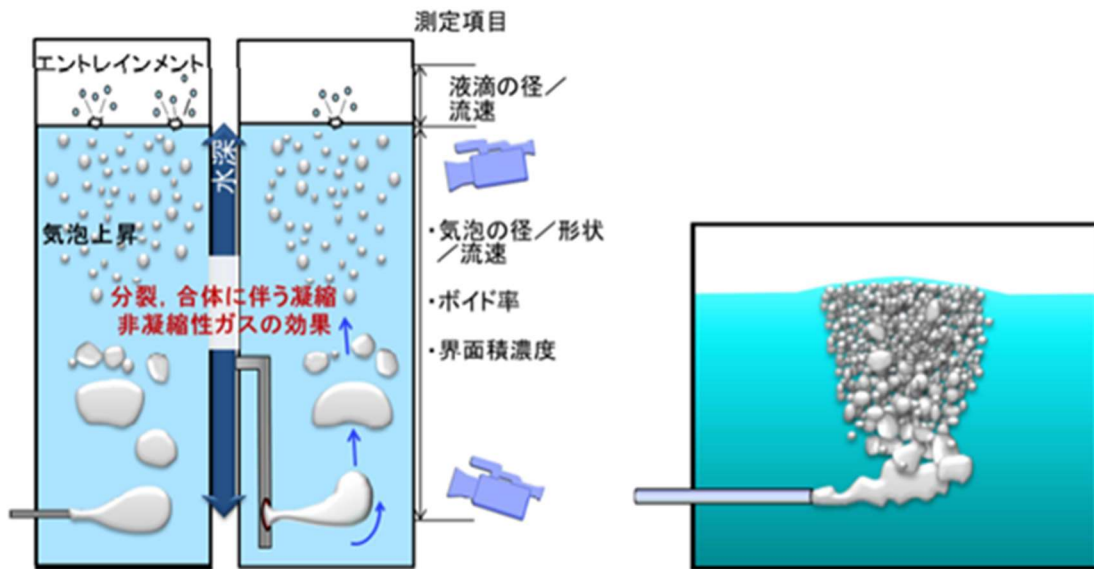


図 3-50 気泡の二相流流動評価実験 実験部概念図

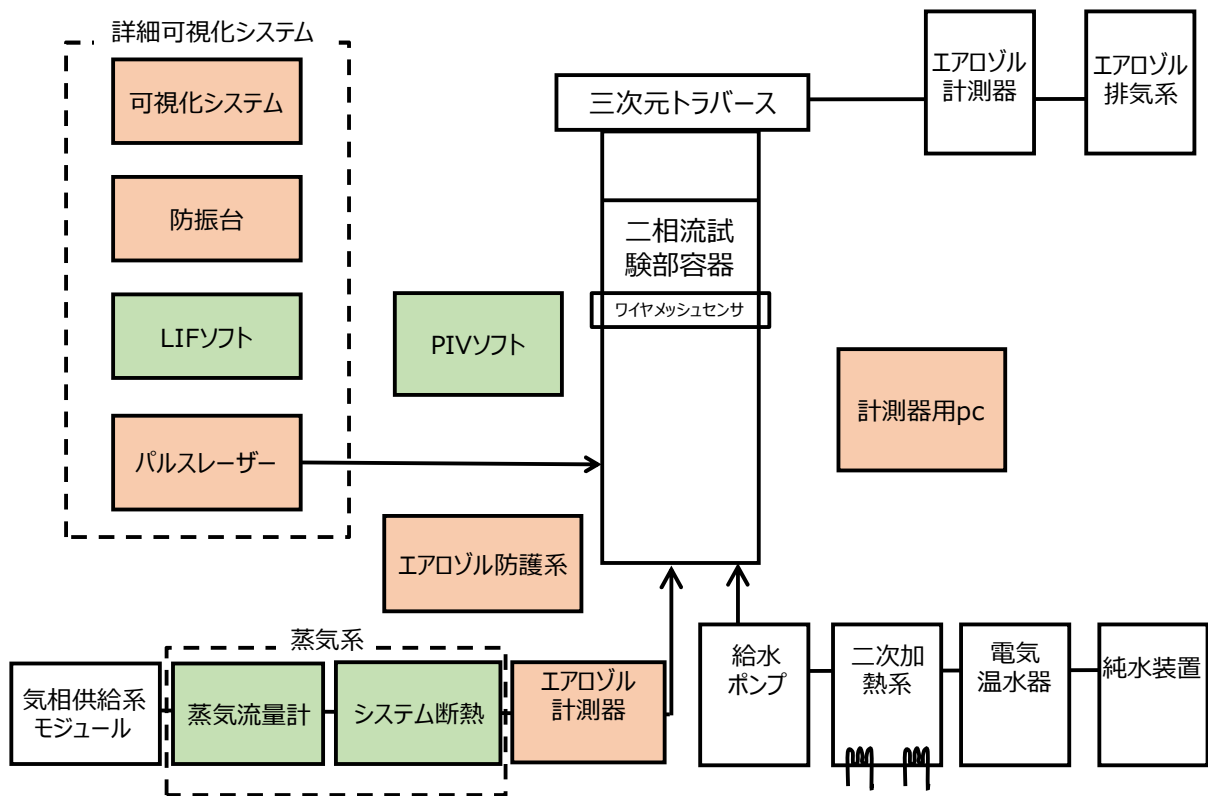


図 3-51 二相流装置 系統図(案)

### 3.2.1. エアロゾルを用いない際の二相流実験装置

本実験では、プールスクラビングにおける気液二相流挙動を計測するために二相流実験装置を使用する。実験装置の系統図を図 3-52 に示す。実験装置は試験水槽と気相供給系、蒸気供給系、給排水系により構成される。試験水槽にはワイヤメッシュセンサ（WMS : Wire Mesh Sensor）が取り付けられており、ボイド率，気相上昇速度，気泡径分布の計測を行う。

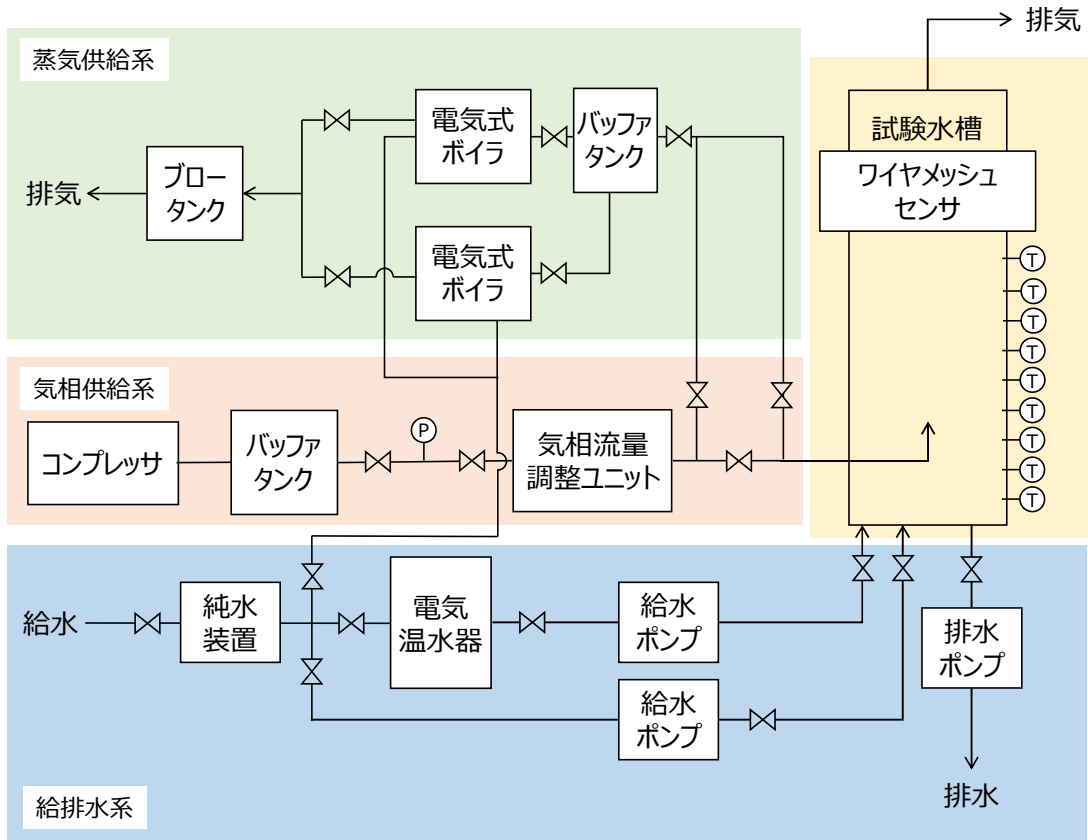


図 3-52 エアロゾルなしの条件下での実験系統図



### 3.2.1.1. 本年度行った二相流実験装置における装置の改造

図 3-51 に二相流装置の系統図を示す。今年度新たに詳細可視化システム, PIV ソフト, 計測用 pc, エアロゾル防護系, エアロゾル計測器, 蒸気系を設置する。

図 3-53 に今年度改造を行った新しい蒸気系統図である。蒸気発生器, エアロゾル発生器から発生させた蒸気, エアロゾルを混合部で混合を行い水槽中にノズルを通し放出する。その際, 蒸気発生器, 混合部, ノズル前で温度, 圧力の計測を行う。また, ノズル前で流量, エアロゾル濃度の計測を行う。昨年度から蒸気流量計の取り付け, 配管断熱を施した。エアロゾル, 蒸気混合部から下流ではエアロゾルの沈着を防ぐために断熱配管内径 4 mm 物を選択した。

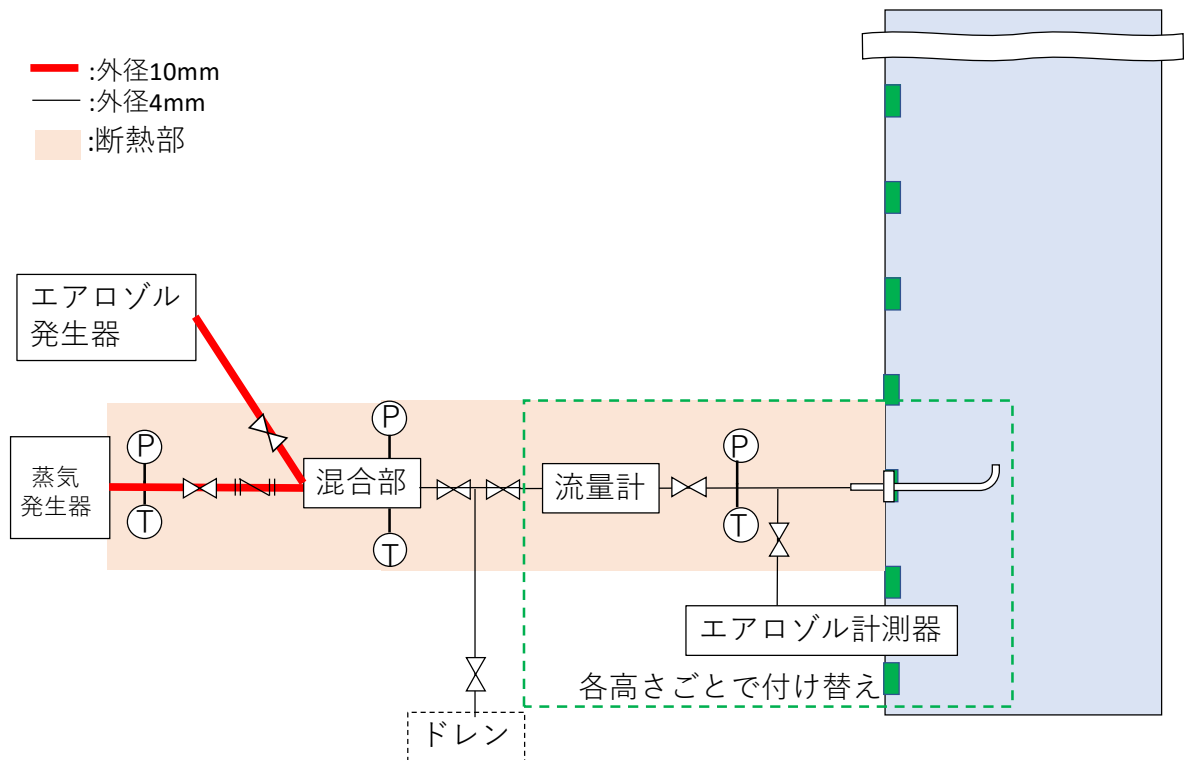


図 3-53 今年度蒸気系統図

### 3.2.1.2. 二相流試験水槽

試験水槽部の概念図を図 3-54 に示す。試験水槽は縦横（内側）500 mm×高さ 2000 mm，厚さ 20 mm の水槽 1，縦横（内側）500 mm×高さ 1000 mm，厚さ 20 mm の水槽 2 および WMS から成り，2 つの水槽の間に WMS が取り付けられている。水槽 1 および 2 はポリカーボネート製であり，およそ 100℃までの水温に耐えられる仕様となっている。水槽 1 には高さ方向に 200 mm 間隔でノズル用ポート，温度計用ポートおよび圧力計用ポートが設けられている。水槽 2 には 200 mm 間隔で温度計用ポートおよび圧力計用ポートが設けられている。ノズル用ポートには共通のフランジを使用することで種々の径のノズルを取り付け可能となっている。本実験ではノズル径 $D_{in}$ に 3, 6, 10 mm のノズルを使用する。

また，図 3-55 に示すようにノズルから水面までの水深を一定にして，ノズルの位置と水位を上下に調整することで，ノズル先端の水頭圧を変えることなく WMS とノズルとの間隔を変えることができる。これにより相対的に様々な水深における WMS による計測を行うことが可能である。さらに水槽側面に沿ってアルミフレームが立てられており，LED ライトをアルミフレームに取り付けることで任意の位置で固定可能である。本試験水槽においては高さ方向を  $z$  軸，水平方向に  $x$ ,  $y$  軸をとる座標系を設定する。

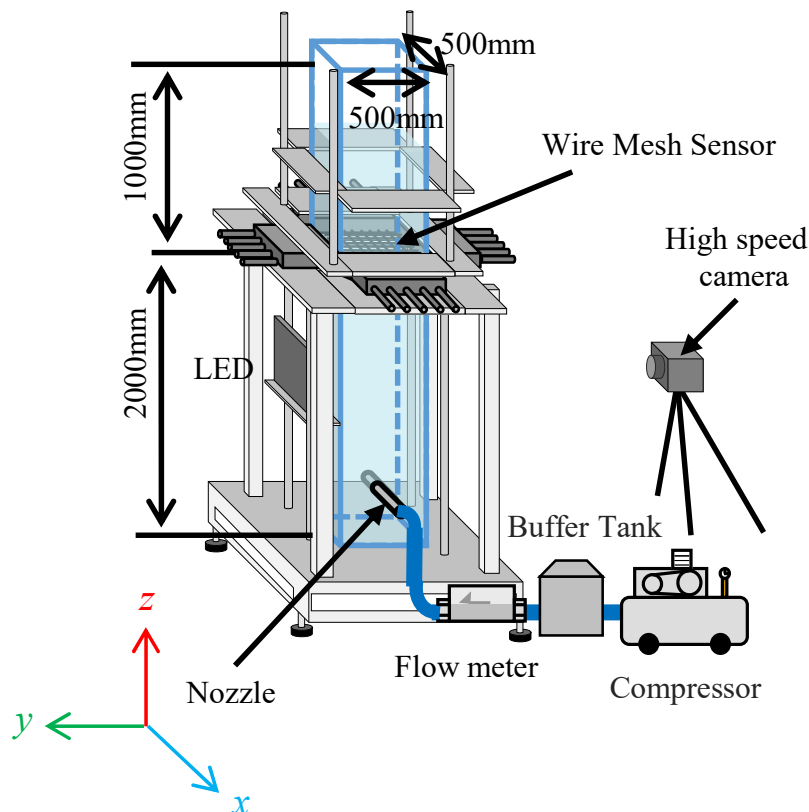


図 3-54 試験水槽部周辺の概念図

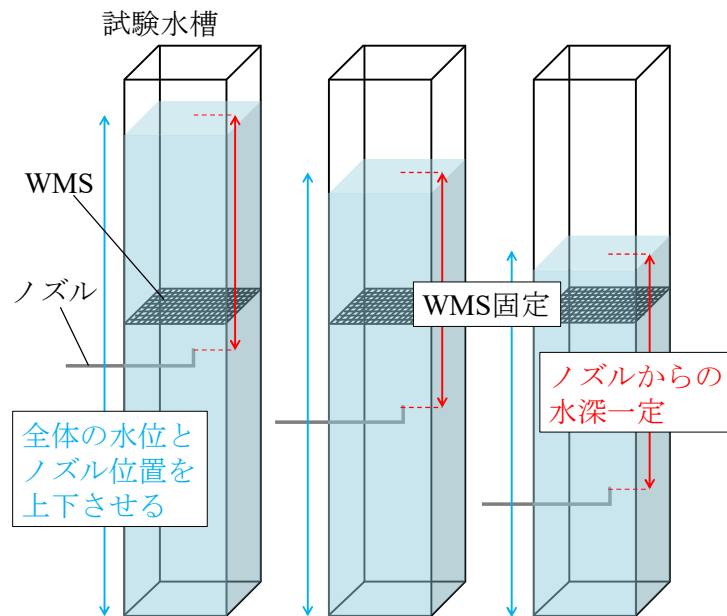


図 3-55 ノズル位置と水位の上下移動による相対的計測位置の調整

### 3.2.1.3. 気相供給系および蒸気供給系

気相供給系はコンプレッサ、バッファタンク、流量調整ユニットから構成される。作動流体としては常温の空気を使用する。吐出圧力はバッファタンクと流量調整ユニットの間に設置した圧力レギュレータにより調節する。また、試験水槽へ供給する流量の調整は流量調節ユニットで行い、2 L/min ~ 100 L/min まで 0.5 L/min 刻みで調節が可能である。100 L/min 以上の流量を流す場合には気体用流量センサ (KEYENCE 社製, FD - A600) を使用する。

蒸気供給系は簡易電気式ボイラ、バッファタンク、ブロータンクから構成される。2 台のボイラで発生させた蒸気はバッファタンクに一度貯められる。また余剰蒸気や配管内で凝縮した水はブロータンクへ排気・排水される。

### 3.2.1.4. 給排水系

給排水系は水道水を純粋装置に通過させた後、常温水の状態試験水槽に供給する系統と電気温水器 (TOSHIBA 社製, HWH - F564) で温水にしてから供給する系統に分かれる。電気温水器では最大で 60 °C まで加熱することができる。

### 3.2.1.5. ワイヤメッシュセンサ

二相流流動挙動を計測する手法として本実験では WMS を使用する。WMS の概念図を図 3-57 に示す。WMS は液相と気相の導電率の違いからボイド率 (気相が占める体積割合) を計測するセンサである。プローブ式センサでは局所的な計測となるのに対して、WMS は試験流路断面全体を同時に計測することが可能であるというメリットがある。詳細な計測原理については後述する。水槽 1 と水槽 2 に挟み込まれる形で WMS は取り付けられている。WMS は流路内にワイヤを張る侵襲型のセンサである。WMS のワイヤの流路断面への侵襲性については、金井ら (Kanai et al., 2011) により十分に小さく、ワイヤ通過による気泡変形の影響は小さいことが確認されている。本

実験で使用した WMS は直径 0.3 mm のワイヤを 7.81 mm 間隔で平行に張ったワイヤ層を直行させた 2 層をさらに重ねた 4 層構造となっている。ワイヤが直行した点が計測点となっている。

#### センサ部仕様

1. 64 チャンネル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 $\cdot$ s の水中において計測可能なこと。

#### コントローラ部仕様

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 3-56 に示す.

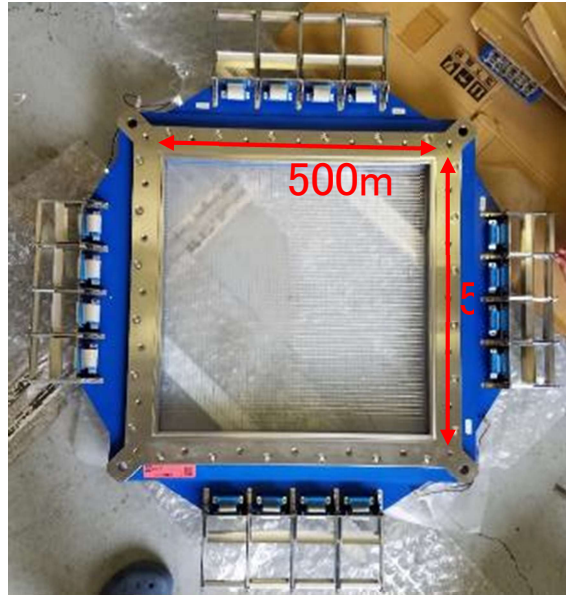
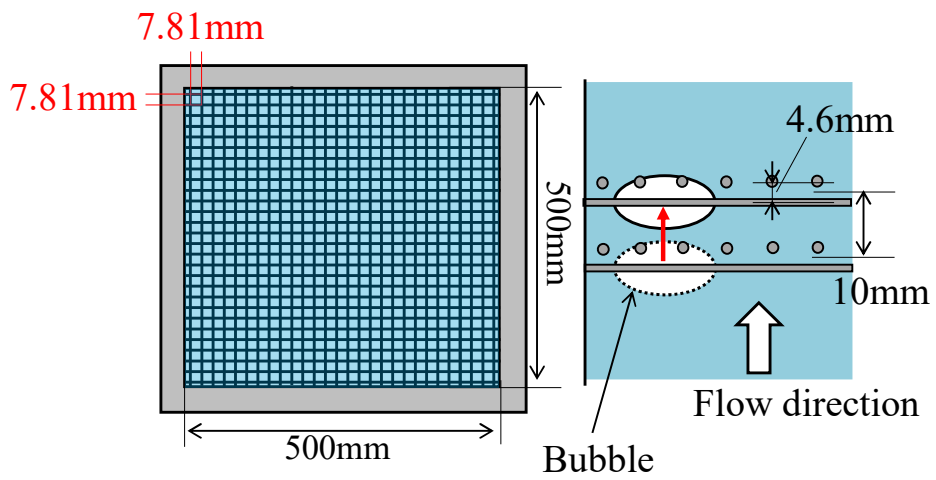


図 3-56 製作したワイヤメッシュセンサ



Measuring points:  $64 \times 64$

Spatial Resolution:  $7.81 \times 7.81\text{mm}$

Wire diameter:  $0.3\text{mm}$

(a) Top View

(b) Horizontal View

図 3-57 WMS の概念図

### 3.2.1.6. エアロゾル計測器

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

$$DF = \frac{N_{Ii}}{N_{Oi}} \quad (26)$$

$N_{Ii}$ はスクラビング前のエアロゾル総質量濃度であり $N_{Oi}$ はスクラビング後のエアロゾル総質量濃度である。そのため除染係数を評価する上では試験部の入口と出口においてエアロゾルの質量濃度を計測する必要がある。図 3-58 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。

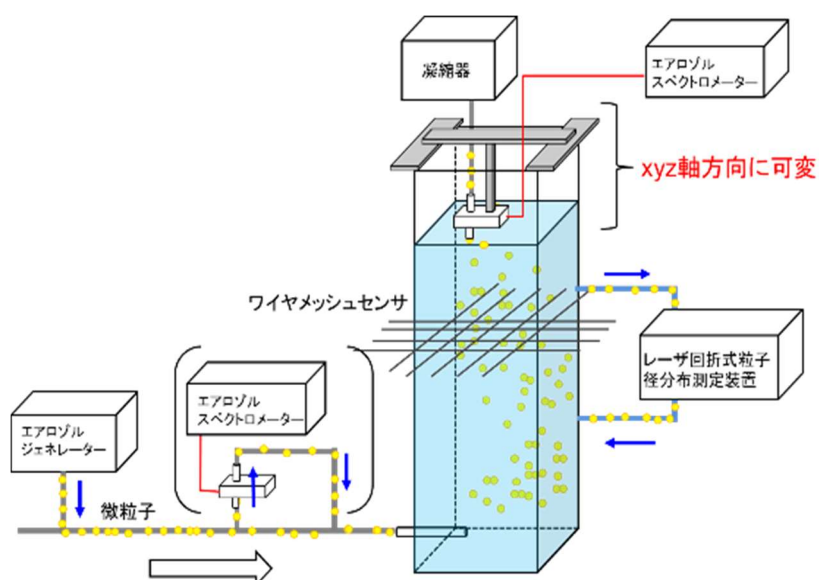


図 3-58 エアロゾル計測の実験体系

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pekt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pektロ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ケーブルで接続されるため、本実験の試験部が3000 mm程度あり、その試験部上部で計測する点においても、適していると言える。エアロゾルスpektロメーターの計測原理としては、コントローラーにあるキセノンランプから発した白色光を、光ファイバを介し、センサ部へ送る。サンプル通過部においてT字型測定領域を構成することで複数の粒子の同時通過によるエラーや領域の端を通過する粒子の過小評価を防いでいる。既知体積の測定領域があり散乱角90度で、粒子の信号を受け、光ファイバを通りコントロール部へ戻す。ここで散乱光のパルス波高で粒径、パルス数から粒子数が解析する。計測原理の概念図を図 3-59に示す。

表 3-9 エアロゾルスペクトロメーター仕様

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

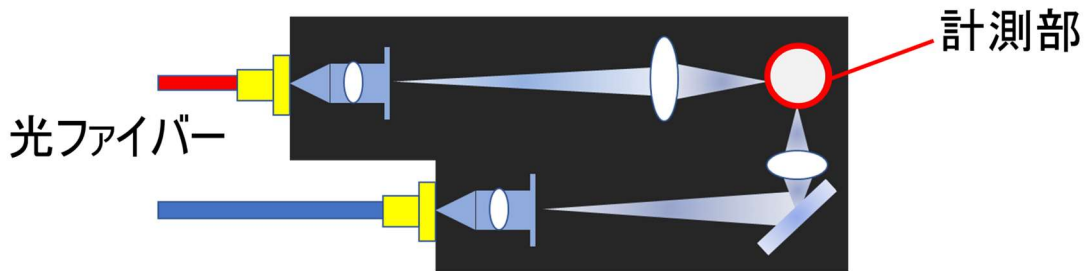


図 3-59 エアロゾル計測原理\_概念図

エアロゾル粒子の濃度検討として図 3-60に示すように系統図に番号付けを行い予備計算した。各点で次の関係式が成り立つとする

$$\dot{N}_{particle} = (Q_G + Q_{particle})N_{particle} \quad (27)$$

$$Q_{particle} = \dot{N}_{particle} \left( 1 + \frac{\pi}{6} d_{particle}^3 \right) \quad (28)$$

$A_{piston}$  ピストン断面積  $d_{particle}^3$  はエアロゾル粒径,  $DF$  は除染係数,  $N_{particle}$  は個数濃度,  $\dot{N}_{particle}$  は個数,  $Q_G$  気相体積流量,  $v_{piston}$  ピストン速度  $\eta$  充填効率としてエアロゾルの発生量は次式で決まる

$$Q_{\text{particle 1}} = \eta Q_{\text{piston}} \quad (29)$$

$$Q_{\text{piston}} = A_{\text{piston}} v_{\text{piston}} \quad (30)$$

発生器①と計測器⑧での個数濃度は既知の値を用いて次式で求まる

$$N_{\text{particle 1}} = \frac{\dot{N}_{\text{particle 1}}}{Q_{G1} + Q_{\text{particle 1}}} = \frac{1}{\frac{\pi}{6} d_{\text{particle}}^3 \left( \frac{Q_G}{\eta A_{\text{piston}} v_{\text{piston}}} + 1 \right)} \text{ [p/cc]} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} N_{\text{particle 8}} &= \frac{\dot{N}_{\text{particle 8}}}{Q_{G1} + Q_{\text{particle 8}}} \\ &= \frac{1}{\frac{\pi}{6} d_{\text{particle}}^3 \left( \frac{DF}{\eta A_{\text{piston}} v_{\text{piston}}} \frac{Q_{G6} + Q_{G7}}{Q_{G6}} (Q_{G1} + Q_{G2}) + 1 \right)} \text{ [p/cc]} \end{aligned} \quad (32)$$

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  $4.2 \times 10^3 \sim \leq N_{\text{particle 8}} \leq 3.5 \times 10^9 \text{ p/cc}$ , エアロゾル粒径  $d_p = 10 \text{ mm}$  の場合 (例: エクспанセル粒子)  $3.8 \times 10^{-1} \sim \leq N_{\text{particle 8}} \leq 3.2 \times 10^5 \text{ p/cc}$  になり, 発生濃度の調整により計測器の範囲内で計測可能であることが確認された. 様々な粒子を使用するため図 3-61 に示すような濃度範囲のセンサを使用することとした.

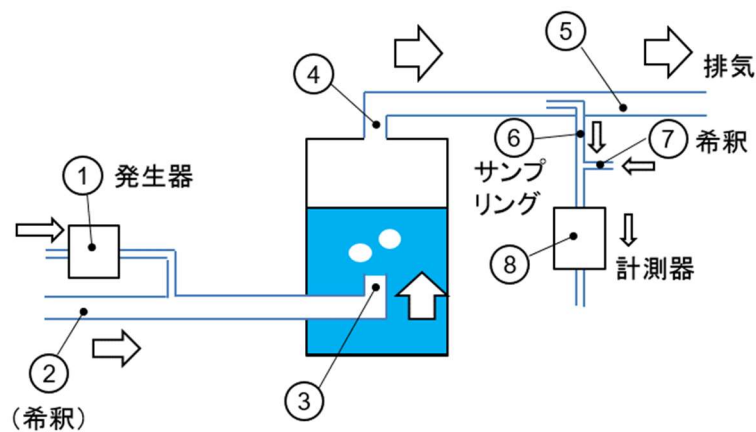


図 3-60 濃度を概算するための計算体系



計測可能範囲(5種類の組み換え)

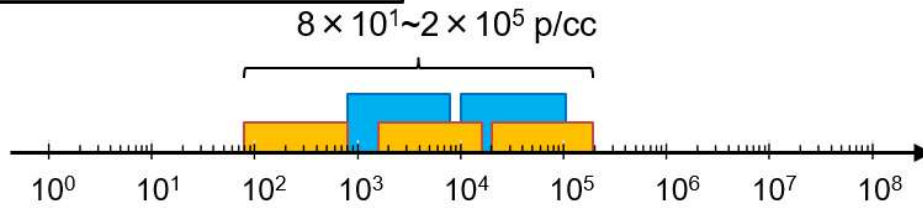


図 3-61 エアロゾル濃度範囲

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/m<sup>3</sup>) を算出する事が可能である。

表 3-10 エアロゾルジェネレーター仕様

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

### 3.2.2. 流動可視化

試験水槽にノズルから噴射された気相噴流を高速カメラ（Photron 社製，FASTCAM Mini UX100），LED ライト（日進電子製，LTD-530300）を用いて，バックライト法により撮影を行った．図 3-62 に示すようにバックライト法は，光がカメラに垂直に入るように光源を設置しカメラと光源の間に存在する被写体の影を撮影する方法である．本実験では被写体となる上昇気泡の射影画像を取得する．レンズは Nikon 社製 AF - S DX Micro - Nikkor 40 mm f/2.8 G を使用する．また，LED ライト単体では水槽全体を照らすことができず，位置によって輝度の違いが生じる．噴流全体を撮影するにはこれを防ぐためにトレーシングペーパーを LED ライトと水槽壁面との間に貼り付け，光を拡散させて撮影を行った．

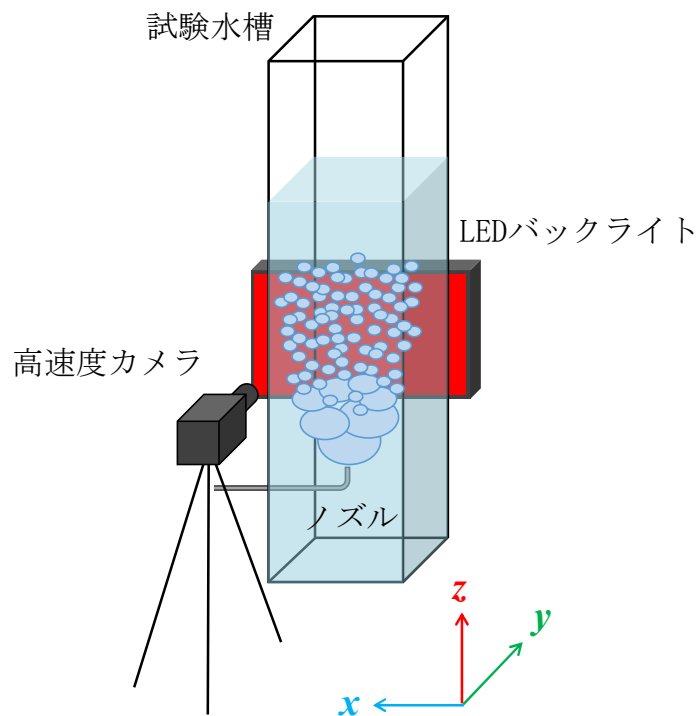


図 3-62 バックライト法による可視化手法

### 3.2.2.1. ボイド率計測

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

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

$$\varepsilon = \frac{U_w - U_{meas}}{U_w} = 1 - \frac{U_{meas}}{U_w} \quad (33) \quad \text{ここ}$$

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

### 3.2.2.2. 気相上昇速度計測

図 3-57 の Horizontal View に示すように WMS はワイヤが直行した層を重ねた構造となっており、層の間隔は 10 mm となっている。あらかじめ層間隔が定まっているので気泡が上流と下流のワイヤ層で計測される時間差から、気相上昇速度を計測する。

### 3.2.2.3. 温度成層の形成および計測

原子力発電所における事故時には図 3-63 に示すように圧力抑制プール内で温度成層が形成されると考えられている。これはベント管から蒸気を含むガスがプール水中へベントされることによるとされている。このような事故時の状況を模擬するために試験水槽内に温度成層を形成した条件下での二相流計測も実施した。温度成層の形成方法としては、まず試験水槽底部から電気温水器で加熱した温水を注入する。温水の注入終了後、冷水を低流量で注入することで成層を形成した。低流量で注入したのは温水と冷水が混合し成層が崩壊することを抑えるためである。噴流注入中は試験水槽側面のポートから挿入した 8 つの温度計により常時温度計測を行う。温度計には K 型熱電対を使用した。K 型熱電対は図 3-64 に示すように水槽壁面から 50 mm 出ている。

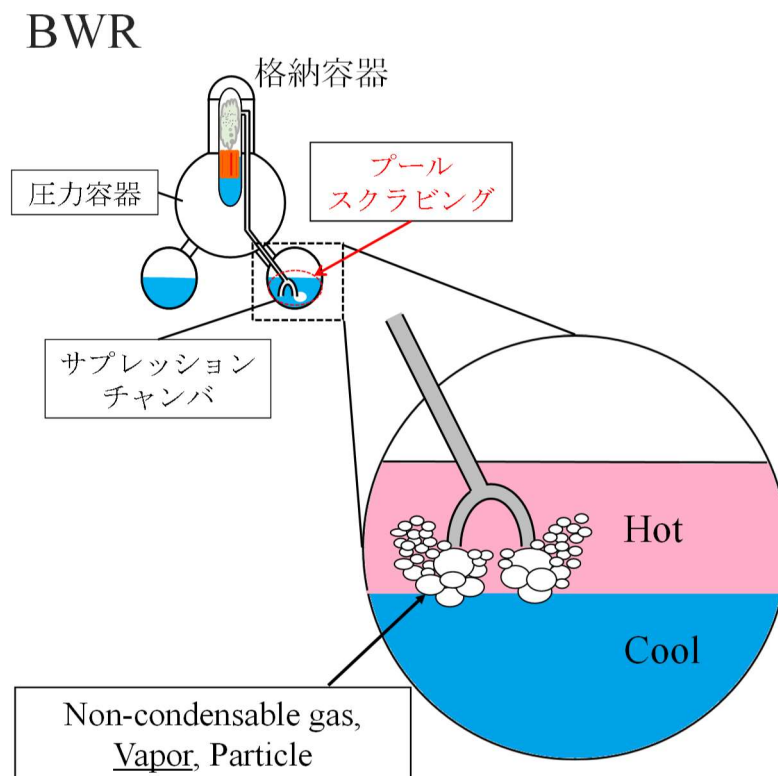


図 3-63 BWR 圧力抑制プール内における温度成層化

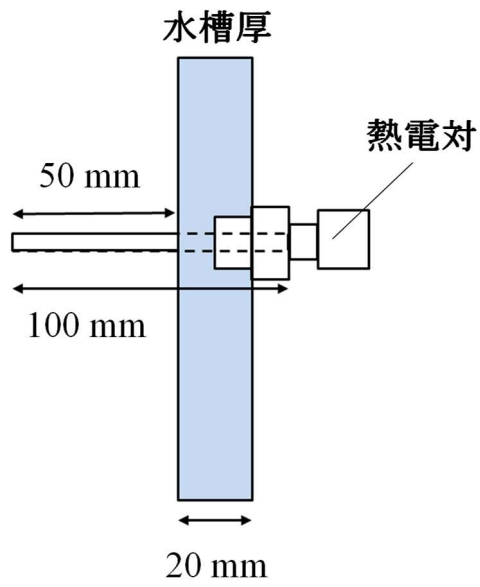


図 3-64 熱電対の挿入図

### 3.2.3. 気相噴流挙動

解析コードにおける流動モデルの妥当性を評価するため，本章ではプールスクラビングにおける気相噴流の流動挙動の計測を行った結果について述べる．

#### 3.2.3.1. 高速度カメラによる流動可視化

ノズル流速 $v_n$ および気相流量 $Q_{air}$ による気相噴流構造への影響を評価するため，ノズル流速一定にした条件と気相流量を一定にした条件で高速度カメラによる噴流全体の可視化撮影を行った．ノズル出口での体積流量をノズル断面積で除したものをノズル流速と定義する．図 3-65 にそれぞれノズル流速 11.8 m/s, 58.9 m/s 時の結果を示す．撮影条件は撮影速度 4000 fps, シャッター速度 1/4000 s, 解像度は 1280 × 1024 である．ノズル流速一定条件下では気相流量の増加に伴って噴流中心部の気相密度が高くなる様子が確認できる．さらに噴流形状の特徴を明瞭にするために複数の画像を重ね合わせ平均をとった．図 3-66 にその結果を示す．可視化結果と同様に気相流量が高流量であるほど中心部の密度が高くなり，また噴流幅がより広がっている傾向が確認された．

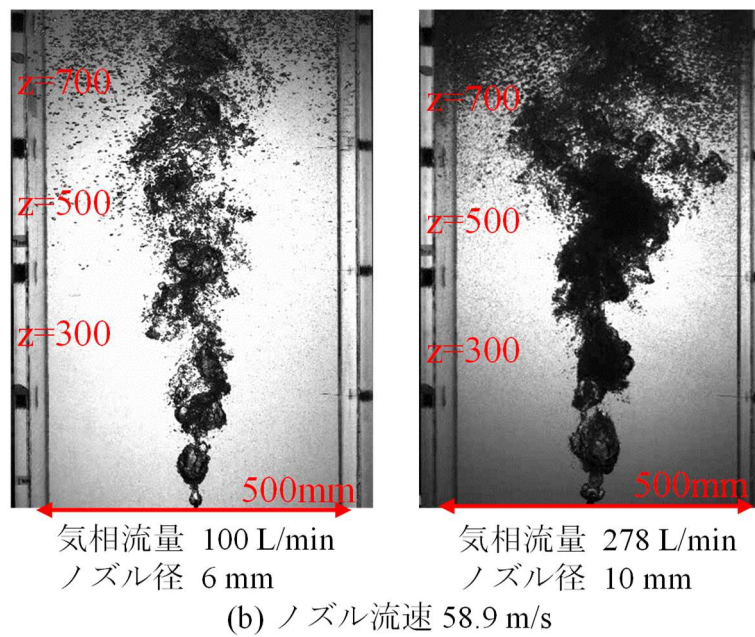
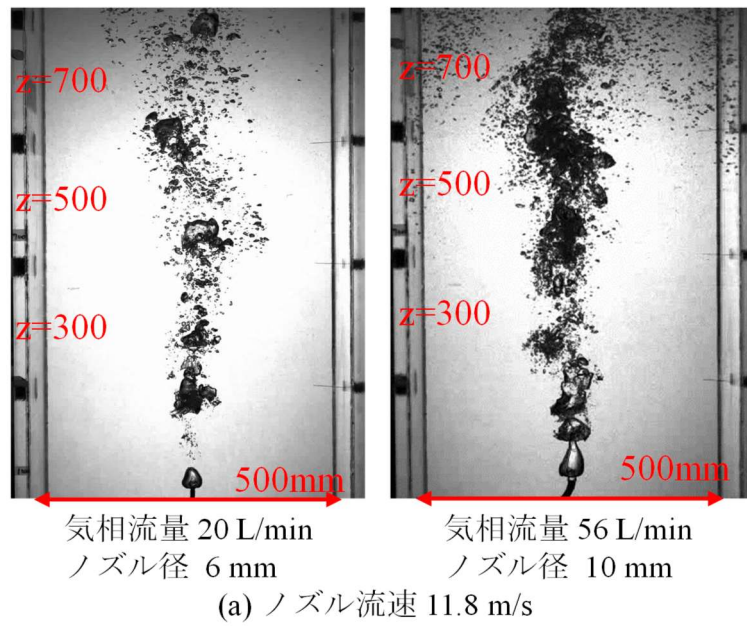


図 3-65 ノズル流速一定条件時の噴流可視化画像  
 ( $v_n = 11.8, 58.9 \text{ m/s}$ ,  $D_{in} = 6, 10 \text{ mm}$ ,  $z = 300, 500, 700 \text{ mm}$ )

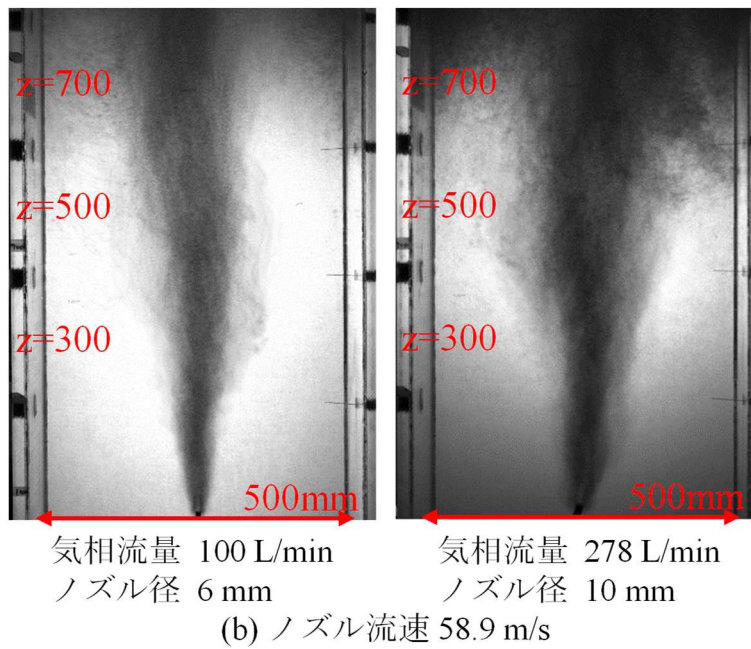
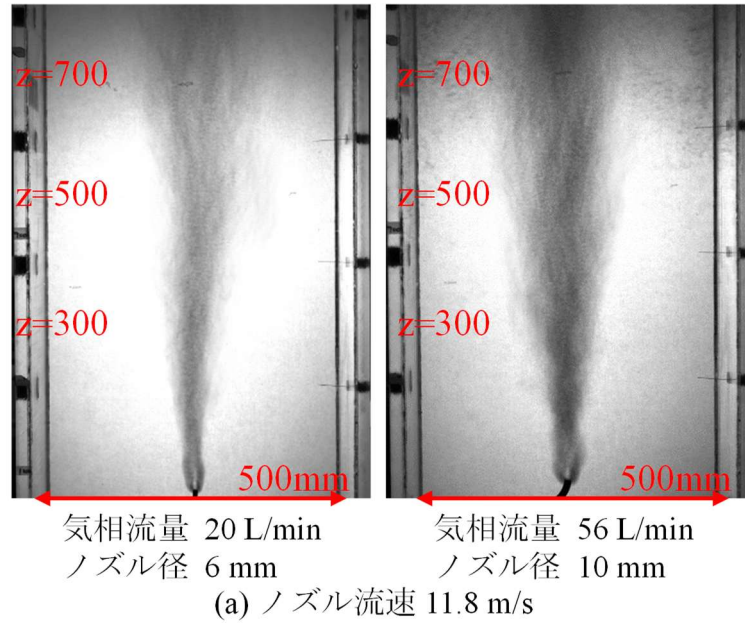
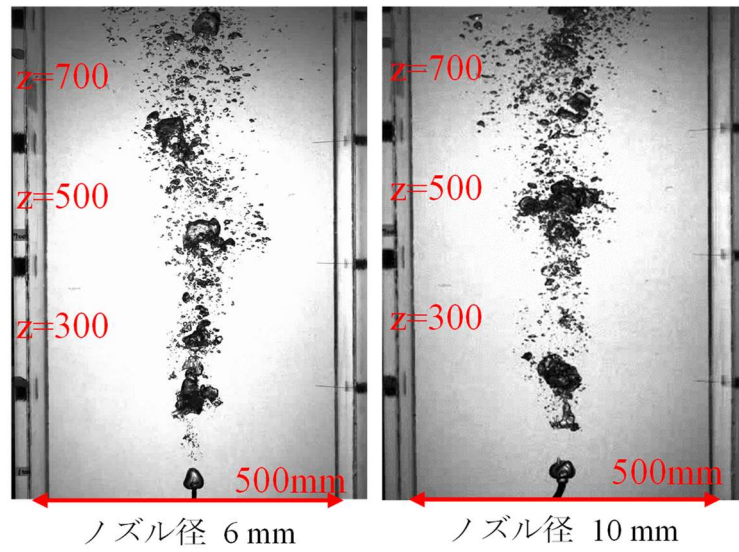


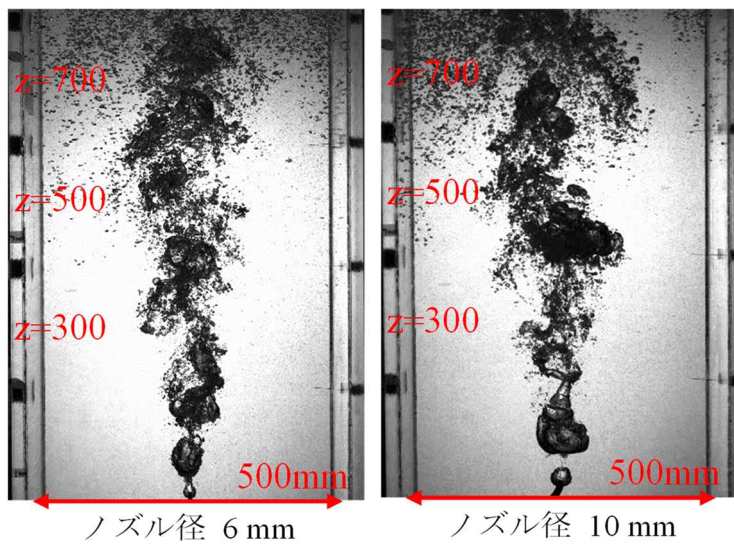
図 3-66 ノズル流速一定条件時の平均画像  
 ( $v_n = 11.8, 58.9 \text{ m/s}$ ,  $D_{in} = 6, 10 \text{ mm}$ ,  $z = 300, 500, 700 \text{ mm}$ )

続いて、気相流量を 20 L/min または 100 L/min で一定にした条件での結果を図 3-67, 図 3-68 に示す。これらを見ると、気相流量一定の条件下ではノズル流速によらず同程度の噴流幅をした形状をしていることが確認された。よって気相噴流全体の挙動はノズル出口における流速ではなく供給される気相流量に大きく依存していることが示唆された。



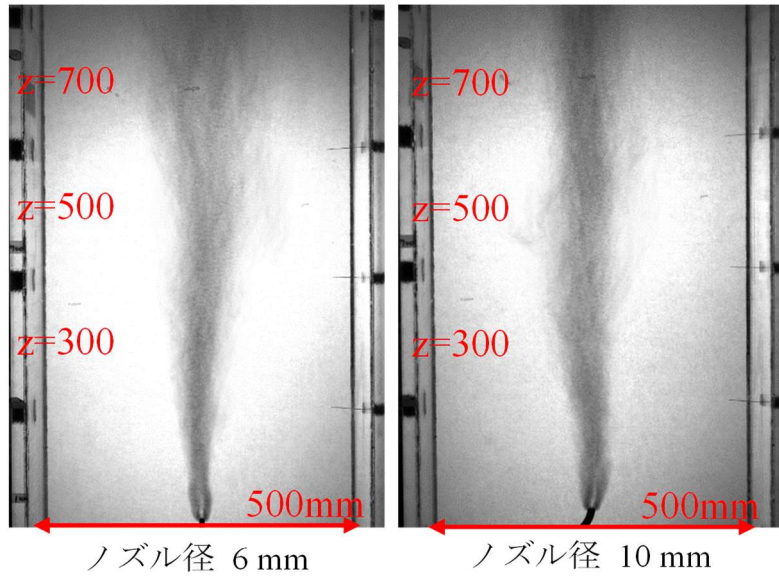


(a) 気相流量 20 L/min

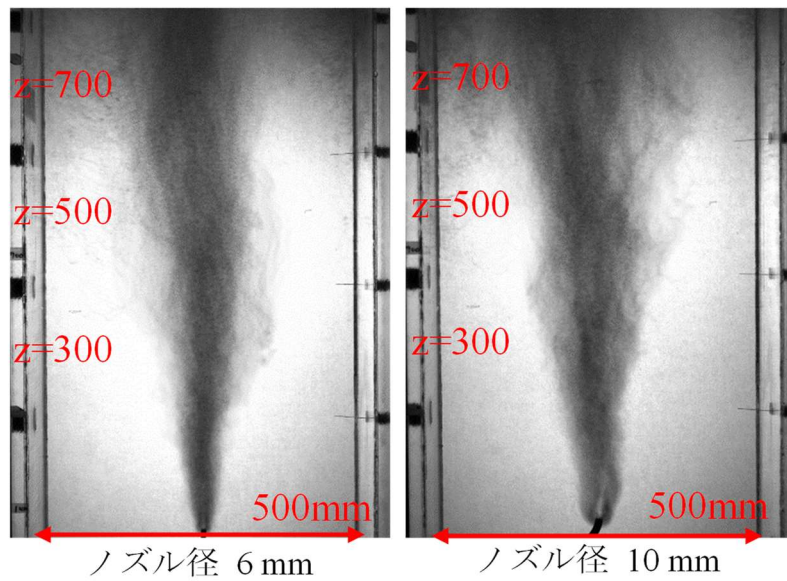


(b) 気相流量 100 L/min

図 3-67 気相流量一定条件時の噴流可視化画像  
 ( $Q_{air} = 20, 100 \text{ L/min}$ ,  $D_{in} = 6, 10 \text{ mm}$ ,  $z = 300, 500, 700 \text{ mm}$ )



(a) 気相流量 20 L/min



(b) 気相流量 100 L/min

図 3-68 気相流量一定条件時の画像平均  
 ( $Q_{air} = 20, 100 \text{ L/min}$ ,  $D_{in} = 6, 10 \text{ mm}$ ,  $z = 300, 500, 700 \text{ mm}$ )

### 3.2.3.2. ワイヤメッシュセンサによるボイド率計測

噴流構造を定量的に評価するために WMS を用いて断面ボイド率分布計測を行った。計測はノズル先端から  $z=300, 500, 700$  mm の高さで行った。一例として流量  $278$  L/min, ノズル径  $10$  mm での噴流に対して、計測時間  $10$  秒間の時間平均ボイド率分布の計測結果を図 3-69 (a)に示す。さらに 3次元分布を  $y-z$ 平面方向から 2次元分布にしたものを図 3-69(b)に示す。どの高さでもノズル直上にあたる位置でボイド率が最大となっている。また、計測点が高くなるにしたがって半径方向にボイド率が拡散し、ピーク値が低下している様子がわかる。

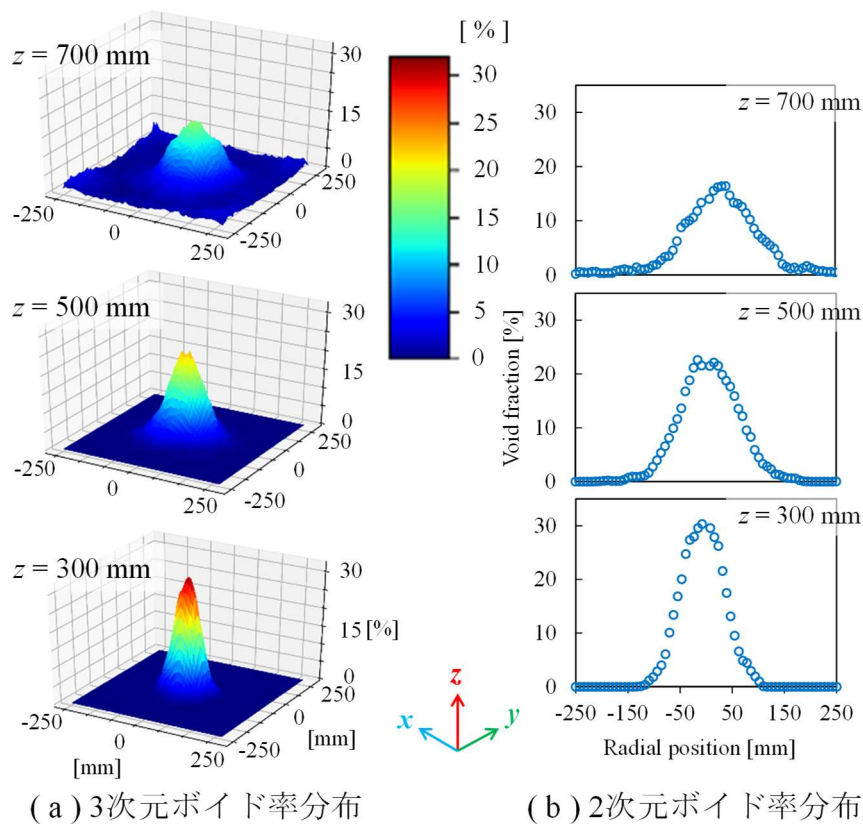


図 3-69 WMS による流れ方向に対する時間平均ボイド率分布 ( $Q_{air}=278$  L/min,  $D_{in}=10$  mm)

2次元ボイド率分布を用いて噴流構造を比較した。ノズル流速一定条件でのボイド率分布を図 3-70 に示す。また気相流量一定条件でのものを図 3-71 に示す。ノズル流速一定条件ではピーク値や分布幅に相違が見られるが、気相流量一定時にはピーク値や分布幅が一致している傾向が確認された。

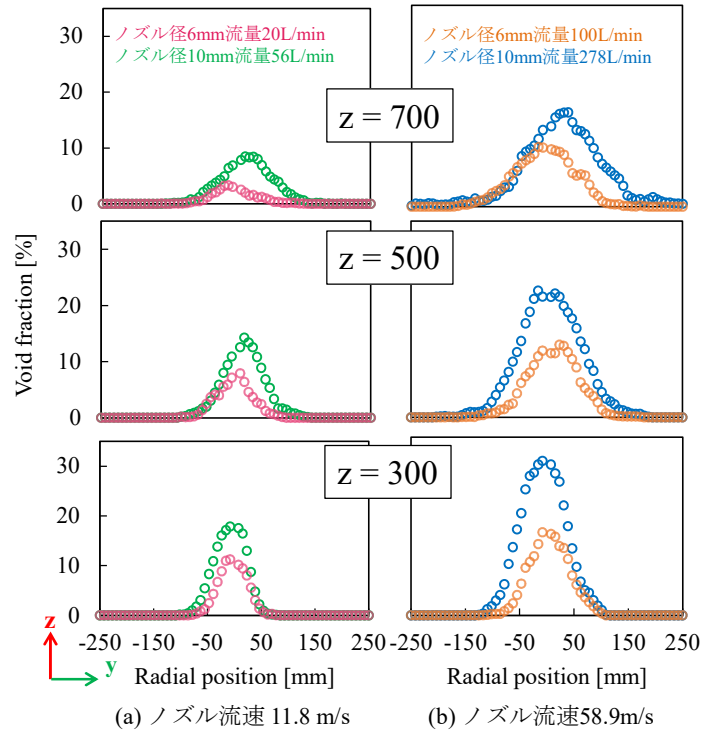


図 3-70 ノズル流速一定条件でのボイド率分布  
 $(v_n = 11.8, 58.9 \text{ m/s}, D_{in} = 6, 10 \text{ mm}, z = 300, 500, 700 \text{ mm})$

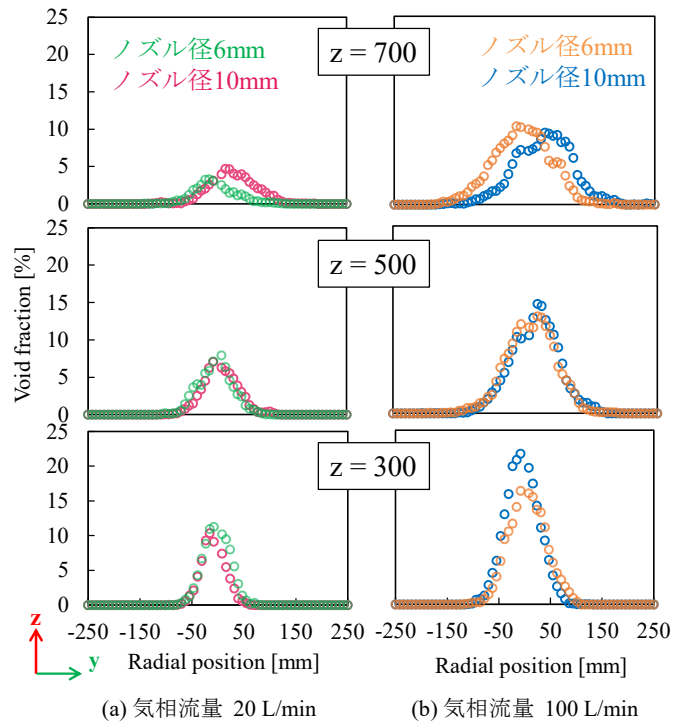
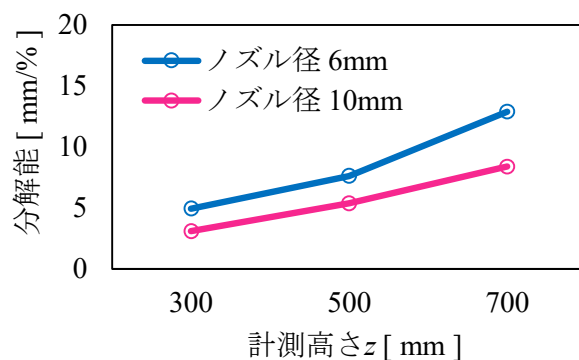
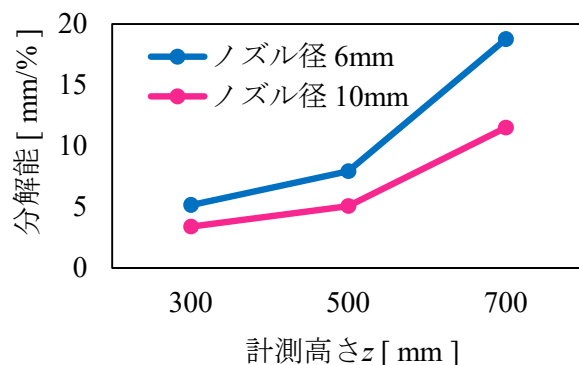


図 3-71 気相流量一定条件でのボイド率分布  
 $(Q_{air} = 20, 100 \text{ L/min}, D_{in} = 6, 10 \text{ mm}, z = 300, 500, 700 \text{ mm})$

ボイド率分布の一致度を定量的に評価するため、半値幅をピーク値で除した値（ここでは分解能と呼ぶ）を用いて比較を行った。図 3-72, 図 3-73 にそれぞれノズル流速一定条件, 気相流量一定条件における分解能の比較を示す。分解能の差が気相流量一定条件では図 3-72(b)において最大で 1.76 mm/%程度であるのに対して, ノズル流速一定条件では図 3-73(a)において最大で 7.24 mm/%程度まで拡大している。

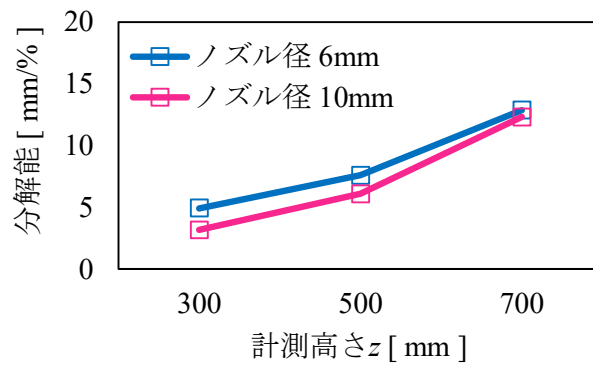


(a) ノズル流速 58.9 m/s

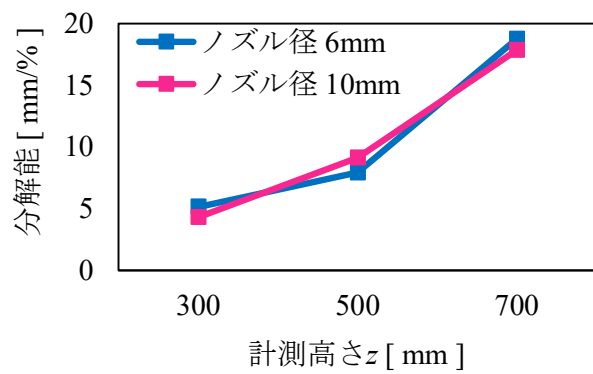


(b) ノズル流速 11.8 m/s

図 3-72 ノズル流速一定条時の分解能比較  
( $v_n = 11.8, 58.9$  m/s,  $D_{in} = 6, 10$  mm,  $z = 300, 500, 700$  mm)



(a) 気相流量 100 L/min



(b) 気相流量 20 L/min

図 3-73 気相流量一定条件の分解能比較  
 ( $Q_{air} = 20, 100$  L/min,  $D_{in} = 6, 10$  mm,  $z = 300, 500, 700$  mm)

### 3.2.3.3. ワイヤメッシュセンサによる気相上昇速度計測

上流と下流の2層のWMSを気泡が通過した時間差から取得した各高さにおける気相上昇速度を計測した。計測はボイド率と同じく、ノズル先端から  $z=300, 500, 700$  mm の高さで行った。一例として流量  $278$  L/min, ノズル径  $10$  mm での噴流に対して、計測時間  $10$  秒間の時間平均気相速度分布の計測結果を図 3-74 に示す。ボイド率と同様に、中央領域で速度が最大となり、計測点が高くなるにつれてピーク値は低下している。

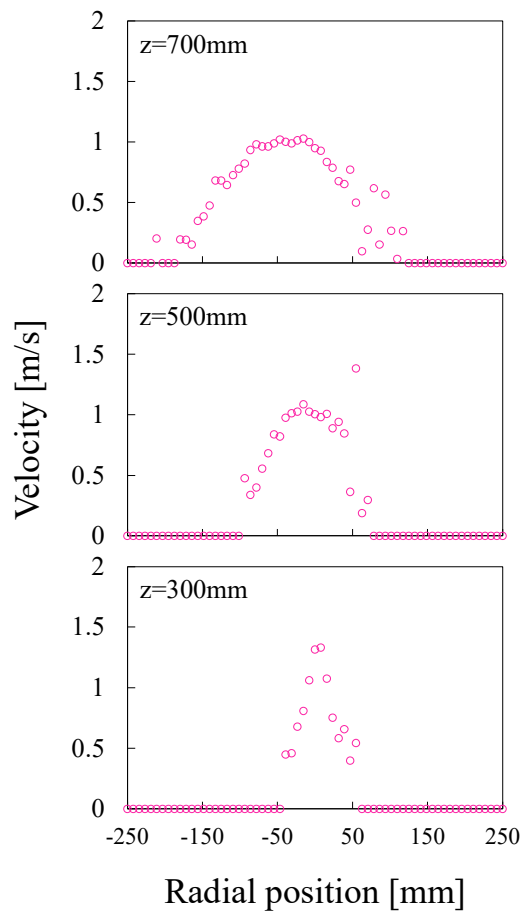
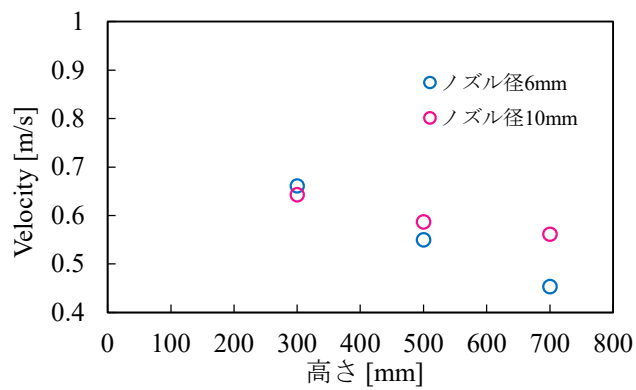


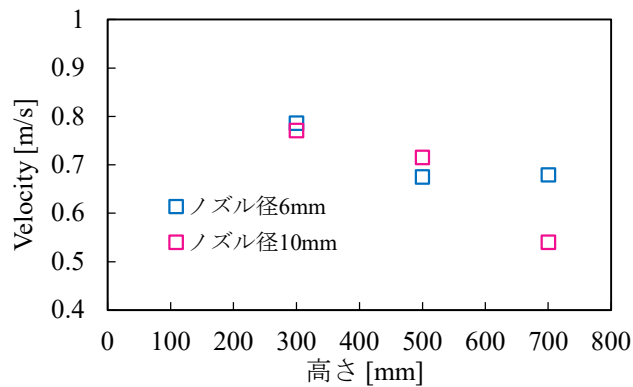
図 3-74 WMS による流れ方向に対する時間平均気相速度分布 ( $Q_{air}=278$  L/min,  $D_{in}=10$  mm)



図 3-74 に示したような 2 次元速度分布において速度  $v$  が  $v > 0$  m/s となる値について相加平均を取り比較した結果を図 3-75, 図 3-76 に示す. 図 3-75 は気相流量一定条件時のもの, 図 3-76 がノズル流速一定条件時のものである. どの条件でも  $z=300$  mm ~ 500 mm では速度が減衰しているが,  $z=500$  mm ~ 700 mm では必ずしも減衰していない. これは気泡の上昇速度が終端速度に達したためであると考えられる. 気相流量一定条件時には 700 mm の位置で差異が生じているものの, その他に位置では良い一致を示している. 一方, ノズル流速一定時には気相流量が高い方が速度が速く推移し一致することはなかった. よって気泡の上昇速度に関してもノズル流速よりも気相流量により依存すると考えられる.



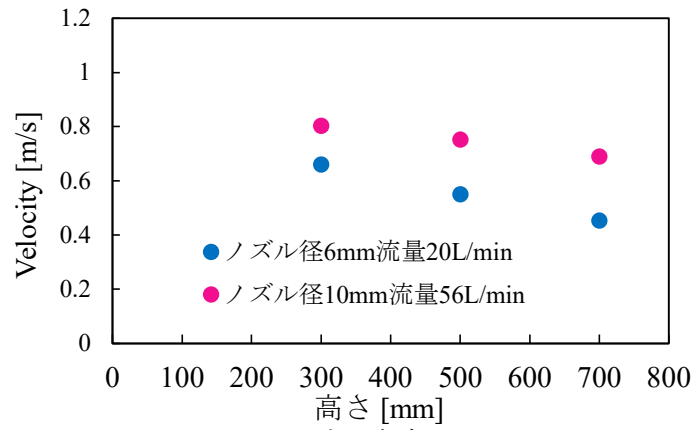
(a) 気相流量 20L/min



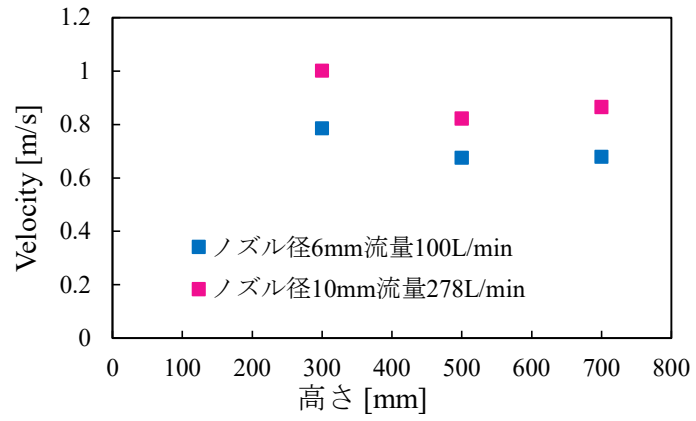
(b) 気相流量 100L/min

図 3-75 気相流量一定条件時の平均流速  
( $Q_{air} = 20, 100$  L/min,  $D_{in} = 6, 10$  mm,  $z = 300, 500, 700$  mm)





(a) ノズル流速 11.8m/s



(b) ノズル流速 58.9m/s

図 3-76 ノズル流速一定条時の平均流速  
 $(v_n = 11.8, 58.9 \text{ m/s}, D_{in} = 6, 10 \text{ mm}, z = 300, 500, 700 \text{ mm})$

#### 3.2.3.4. 噴流中の気泡径分布計測

気相噴流中の気泡径分布の WMS による計測を行った。ここでは気相流量を 10, 50, 100 L/min とし、計測点はノズル先端から  $z = 100, 300, 500, 700, 900$  mm の位置で計測を行った。ノズル径は 10 mm のみである。結果を図 3-77, 93 図 3-78 に示す。図 3-77 の縦軸は個数割合、図 3-78 の縦軸は体積割合を示している。まず図 3-77 を見ると  $z = 100$  mm では流量が増すほどより大きな気泡の分布が確認できる。計測点上がるにつれて流量によらず気泡径が小さい方へと分布がシフトしている傾向が確認された。下流では気泡径のピークが流量 10 L/min 時には約 7 mm に収束している。一方、流量 50, 100 L/min 時には下流でピークが約 3 mm に収束している。 $z = 300$  mm 以上では直径 30 mm 以下の小さな気泡が大半を占めおり、 $z = 100$  mm ~ 300 mm の間に急速に気泡の分裂が進んでいることが確認された。

続いて図 3-78 を見ると、 $z = 900$  mm において流量 50, 100 L/min 時に比べて 10 L/min 時には気泡径 20 mm 以上の気泡の割合が高くなっており、比較的大きな気泡の残存割合が高いことが確認できる。これらの傾向は流量の増加に伴って気相密度が増加し、気泡が相互に作用して不安定になり分裂が促進されたのではないかと考えられる。また、流量増加に伴って上昇速度増加により気泡にかかるせん断力の増加も要因として考えられる。

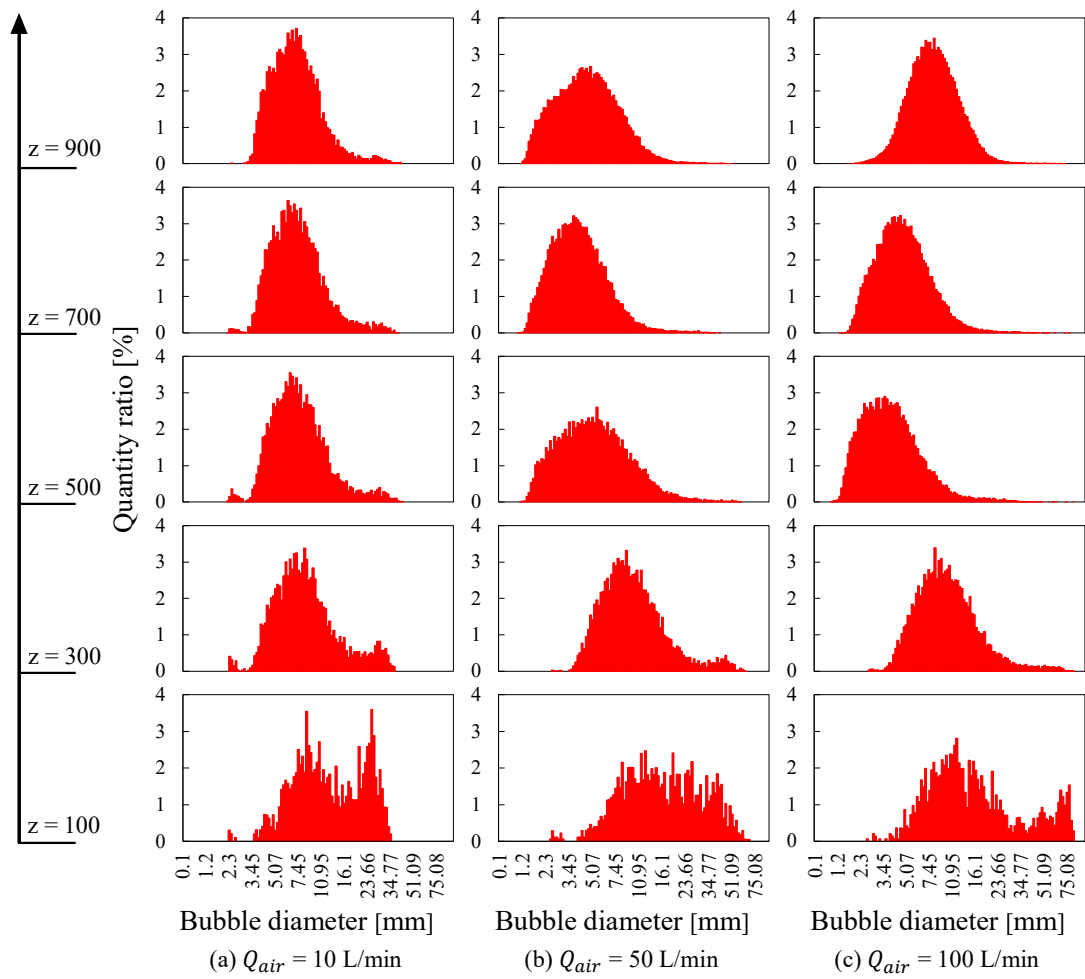


図 3-77 個数割合に対する気泡径分布  
 ( $Q_{air} = 10, 50, 100 \text{ L/min}$ ,  $D_{in} = 10 \text{ mm}$ ,  $z = 100, 300, 500, 700, 900 \text{ mm}$ )

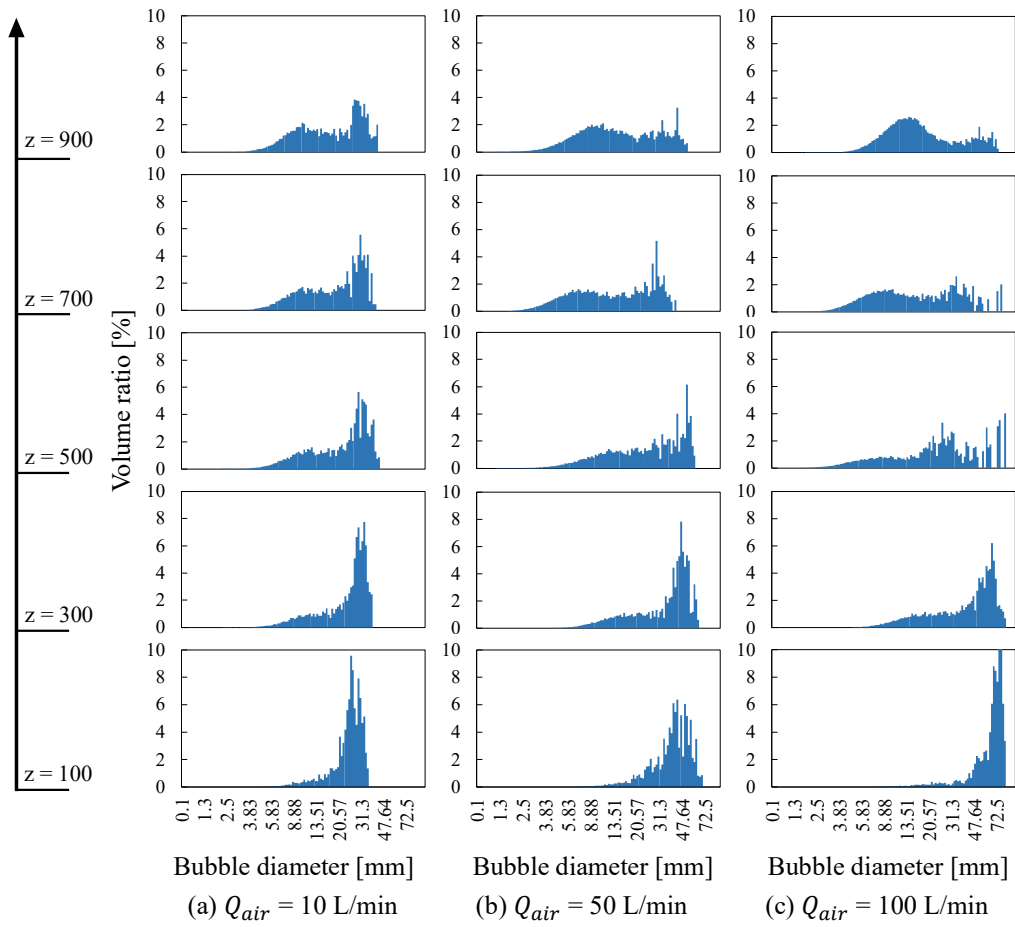


図 3-78 体積割合に対する気泡径分布  
 ( $Q_{air} = 10, 50, 100 \text{ L/min}$ ,  $D_{in} = 10 \text{ mm}$ ,  $z = 100, 300, 500, 700, 900 \text{ mm}$ )

### 3.2.3.5. 温度成層の形成および計測

試験水槽内に温度成層が形成される過程を観察した。温度成層形成過程の温度推移測定結果を図 3-79 に示す。温度計測を開始後、50 °C程度の温水を水槽上部より注入を開始した。そのため全ての高さで温度が同時に上昇している。 $z =$  mm 程度まで温水を注入した後、その状態で 25 分間放置し温度推移を観察した。その結果、ある程度温度が維持されることを確認した。その後、水槽底部より 16 °C程度の冷水を注入開始し、全体の水位が 2300 mm 程度になるまで注入した。冷水を注水流量 20 L/min 程度で注水した結果、混合が進み  $z = 800$  mm 付近の水温まで低下した。冷水の注入終了後も温度成層が維持されることを確認した。よって本実験体系においても温度成層が形成できることを確認した。

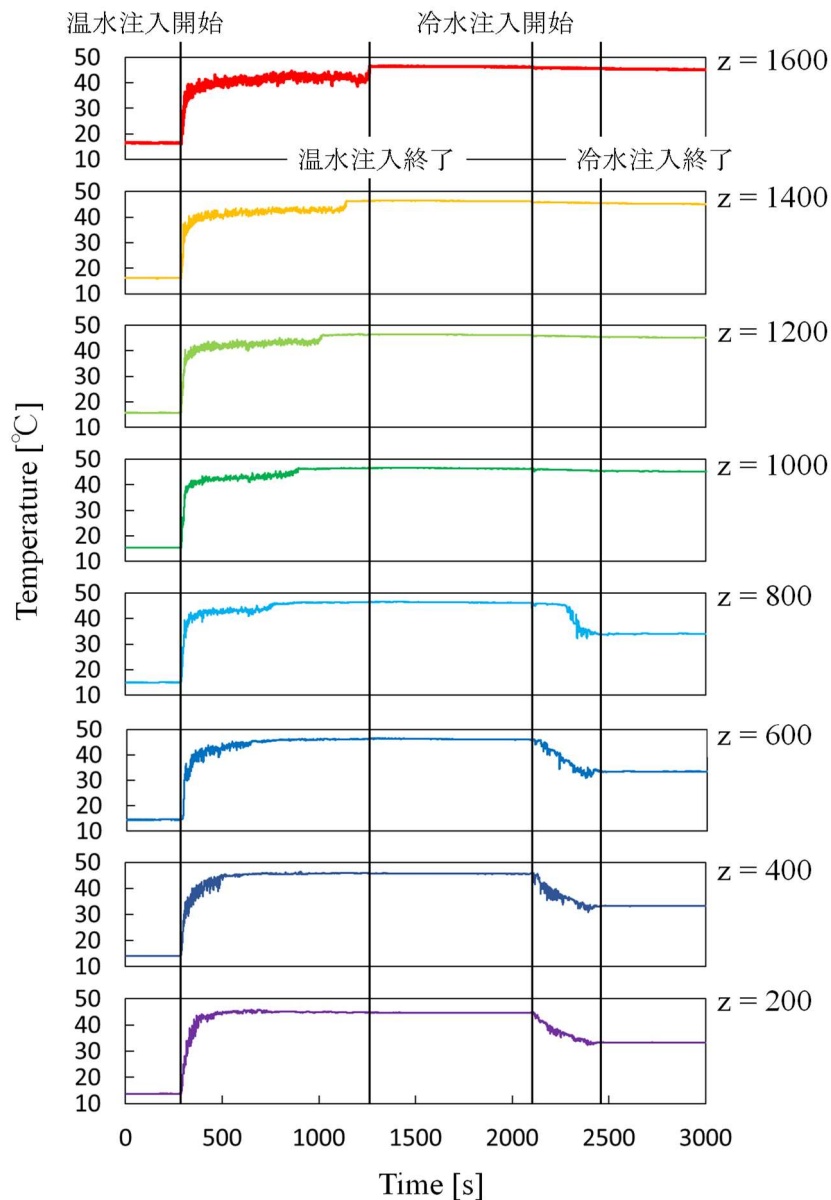


図 3-79 温度成層形成過程の温度推移

続いて図 3-80 に示すような 3 パターンの温度成層を形成した条件下でそれぞれ噴流の WMS による計測を行い、比較した。3 種類のパターンを比較するのは密度界面の存在やその位置が流動挙動に影響する可能性を考慮したためである。計測点はノズル先端から 100, 300, 500 mm 上方の位置で行った。実験条件はノズル径は 10 mm, 気相流量は 50 L/min, 温水温度約 50 °C, 冷水温度約 16 °C, 気相温度約 20 °C である。

それぞれの温度成層で計測したボイド率分布および気相上昇速度を比較する。気相噴流の注入を開始すると温度成層の混合が促進される。計測は噴流を注入開始後 3 分経過後と 60 分経過後に行った。3 分経過時点では十分に混合が進んではおらず水温が安定しない。一方、60 分経過後には水槽内全体の混合が進み水温が安定する。一例としてパターン 3 でノズルから 500 mm 上方の位置で WMS による計測を行った際の温度計測結果を図 3-81 示す。温度計測開始後 5 分経過後に噴流の注入を開始した。噴流注入開始後 3 分経過時点では温度変動があるが、60 分経過後にはどの計測点でも温度が安定していることがわかる。

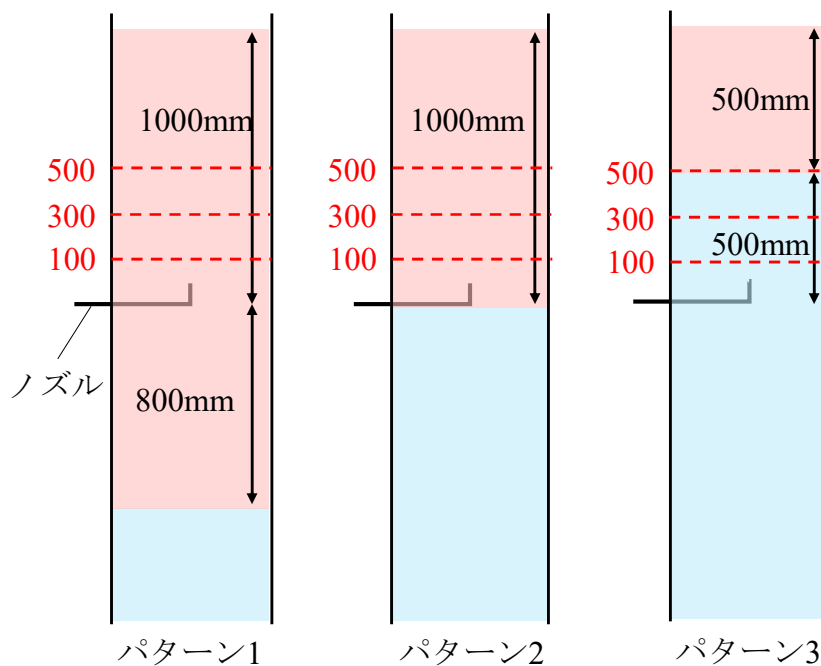


図 3-80 温度成層パターン

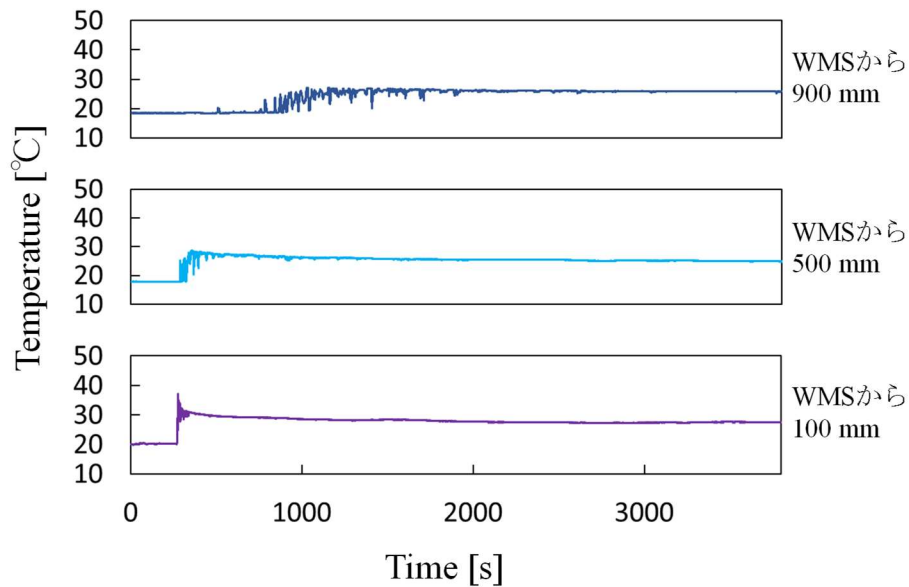


図 3-81 噴流注入による液温変動( $Q_{air}=50$  L/min,  $D_{in}=10$  mm)

WMS によるボイド率分布および気相上昇速度分布を図 3-82, 図 3-83 に示す. 左からパターン 1, 2, 3 の分布計測結果である. ボイド率分布を見ると, どのパターンにおいても計測位置が低いほどボイド率が高く, 計測位置が高いほど分布域が広がっている. また上昇速度分布を見ても同様の傾向を確認することができる. これらの傾向は温度成層を形成していない条件下で計測された結果でも確認されている. また, パターンの違いによる分布の有意な差は確認されなかった. さらに時間をずらして計測した場合にも計測結果に有意な差は確認されなかった. 常温の気相噴流を注入した条件では流動挙動に温度成層の影響が及ばないことを確認した.

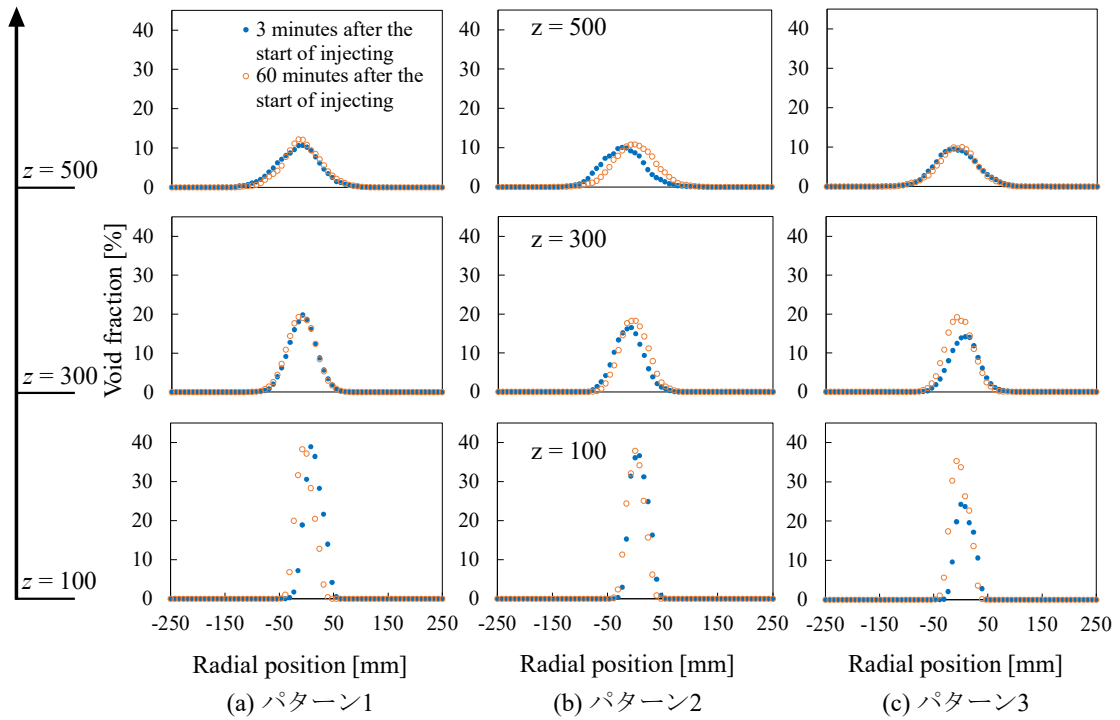


図 3-82 温度成層におけるボイド率分布  
 $(Q_{air} = 10, 50, 100 \text{ L/min}, D_{in} = 10 \text{ mm}, z = 100, 300, 500 \text{ mm})$

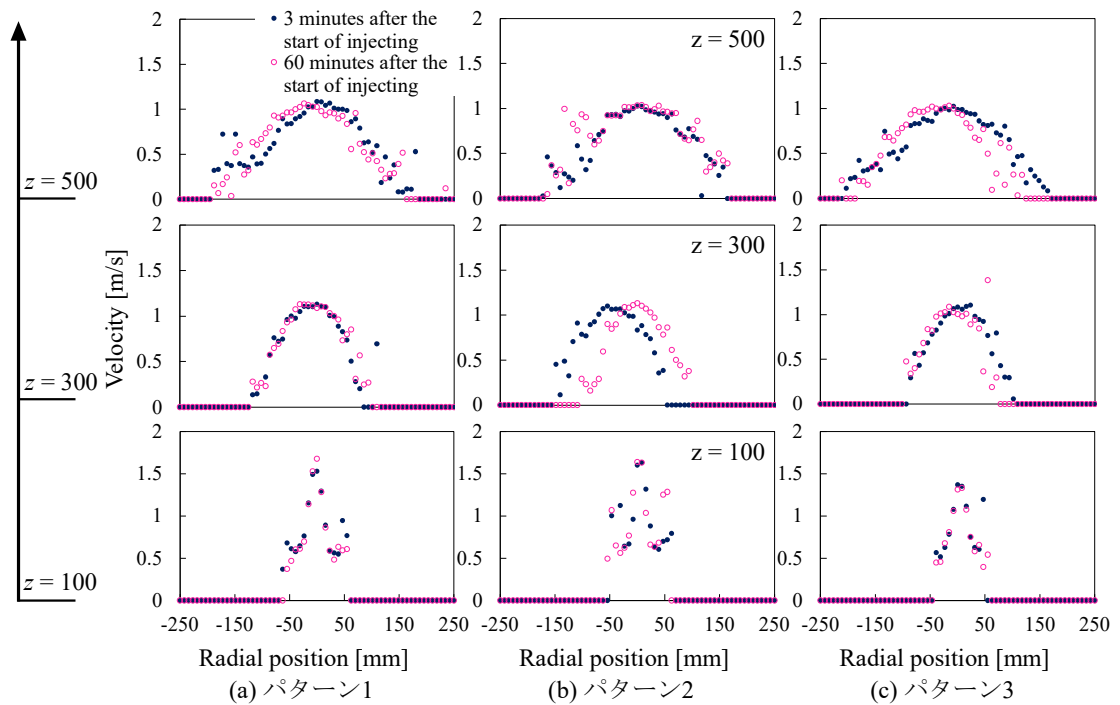


図 3-83 温度成層における速度分布  
 $(Q_{air} = 10, 50, 100 \text{ L/min}, D_{in} = 10 \text{ mm}, z = 100, 300, 500 \text{ mm})$



### 3.2.4. ノズル先端における大気泡形成

解析コードにおけるグローブール分裂領域に注目して、ノズル出口領域での大気泡の形成挙動の観察および計測を行った。

#### 3.2.4.1. ノズル先端での大気泡形成挙動

ノズル先端において大気泡が形成され、離脱していく様子を高速度カメラにより可視化した結果を図 3-84 に示す。これを見ると大気泡がノズルを離脱後、下から気柱が大気泡を貫通していくような、既存の解析コードにおいて言及のない挙動が確認された。気相は一定圧力で連続的に供給されているにもかかわらず、このような挙動が断続的に繰り返されている。

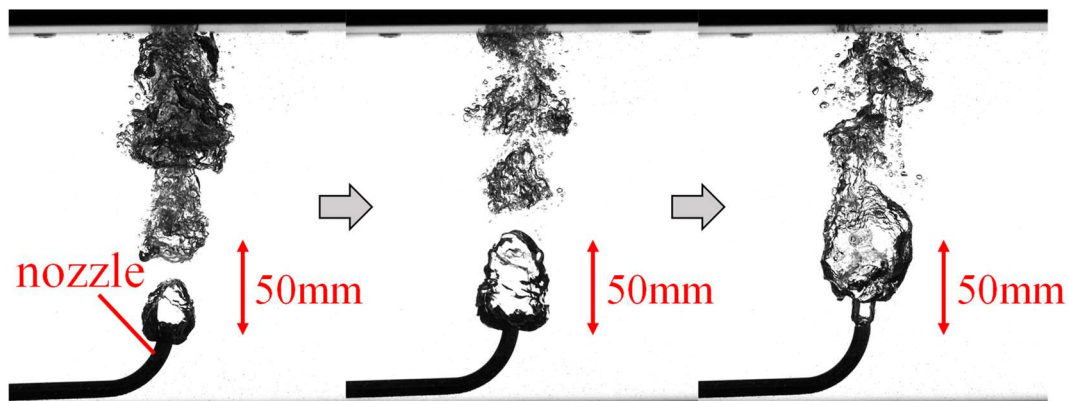


図 3-84 ノズルにおける大気泡形成の可視化

#### 3.2.4.2. 低流量条件下での気相流量およびノズル径に対する大気泡径計測

図 3-85 のように画像からノズル先端における大気泡の長軸と短軸を計測し、それらを用いて面積等価直径を算出した。平均等価直径 $d_B$ を表 3-11 低流量時の大気泡等価直径 $d_B(Q_{air}=2, 5, 9 \text{ L/min}, D_{in}=3, 6, 10 \text{ mm})$ に示す。ノズル径は 3, 6, 10 mm とし、気相流量は 2, 5, 9 L/min とした。

このとき気相流量とノズル径、ノズル流速について等価直径の比較を行った。結果を図 3-86, 図 3-87, 図 3-88 に示す。図 3-86 を見ると、気相流量を増すとノズル径によらず等価直径も大きくなっていることがわかる。図 3-87 を見ると、気相流量が同じとき、ノズル径によらず等価直径が近い値となっている。図 3-88 を見ると、ノズル流速が速い方が等価直径が大きく、ノズル径が大きくなるに比例して等価直径も線形に増加している。

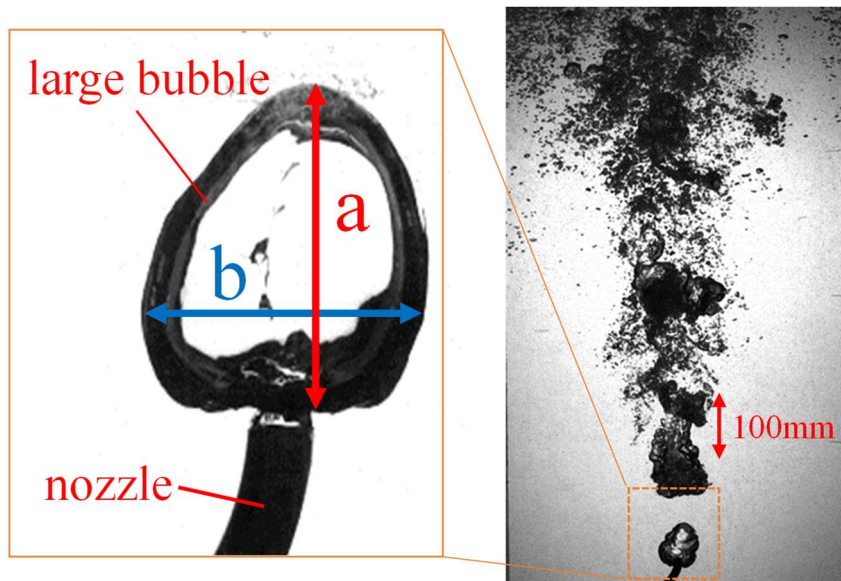


図 3-85 大気泡径計測

表 3-11 低流量時の大気泡等価直径 $d_B$ ( $Q_{air}=2, 5, 9$  L/min,  $D_{in}=3, 6, 10$  mm)

$D_{in}$ [mm]	$Q_{air}$ [L/min]	$d_B$ [mm]
3	2	14.2
3	5	20.1
3	9	23.6
6	2	14.9
6	5	19.2
6	9	23.6
10	2	16.6
10	5	19.4
10	9	22.5

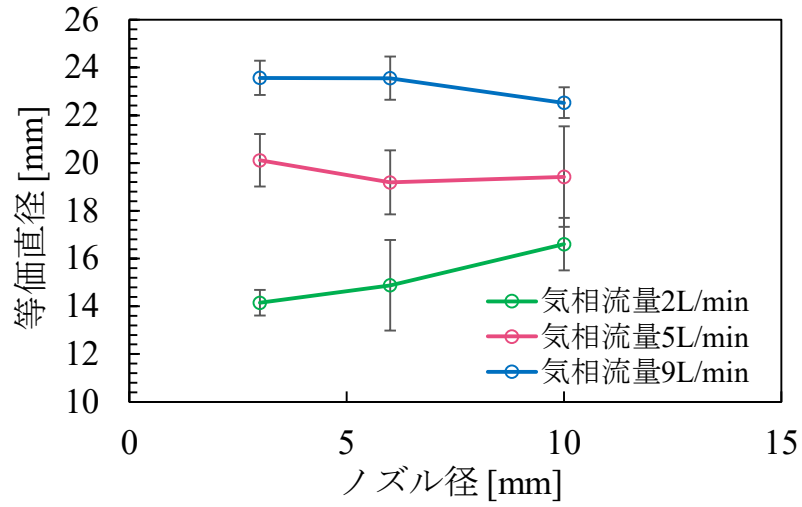


図 3-86 ノズル径に対する等価直径比較( $Q_{air} = 2, 5, 9$  L/min,  $D_{in} = 3, 6, 10$  mm)

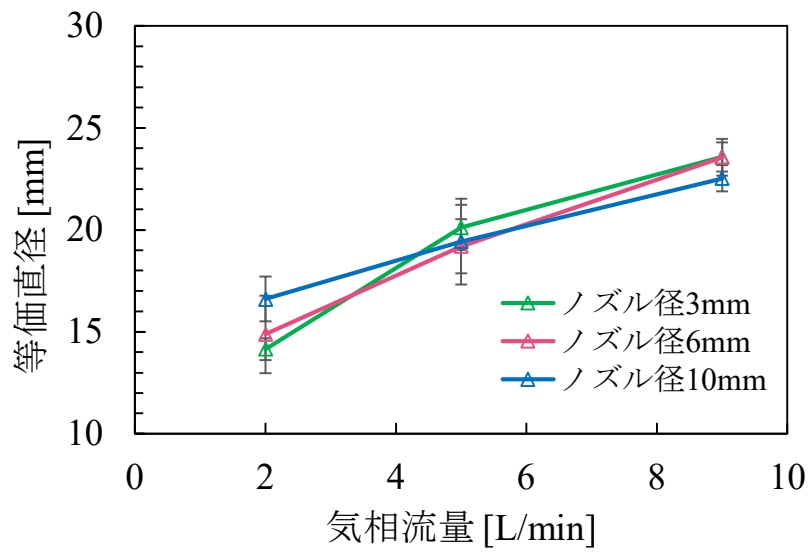


図 3-87 気相流量に対する等価直径比較( $Q_{air} = 2, 5, 9$  L/min,  $D_{in} = 3, 6, 10$  mm)

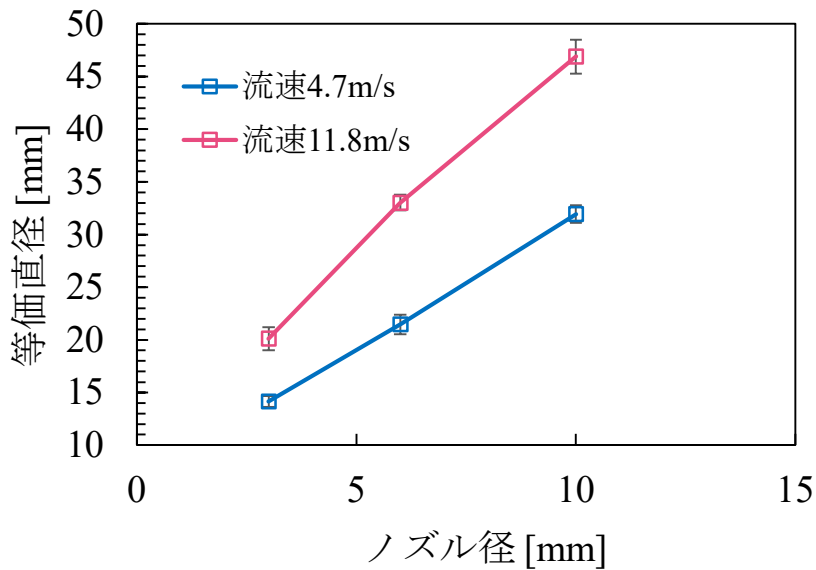


図 3-88 ノズル流速に対する等価直径比較( $v_n = 4.7, 11.8 \text{ m/s}$ ,  $D_{in} = 3, 6, 10 \text{ mm}$ )

### 3.2.4.3. 中高流量条件下での気相流量に対する大気泡径計測

本章ではノズル径を 10 mm のみとし，気相流量を 10, 50, 100 L/min とした．前章と同様に画像からノズル先端における大気泡の長軸と短軸を計測し，体積等価直径を算出した．平均等価直径を表 3-12 に示す．低流量時と同様に流量を増すと気泡径が大きくなっている．

表 3-12 中高流量時の等価直径 $d_B$ ( $Q_{air} = 10, 50, 100 \text{ L/min}$ ,  $D_{in} = 10 \text{ mm}$ )

$Q_{air}$ [L/min]	$d_B$ [mm]
10	25.2
50	46.5
100	60.0

### 3.2.5. 蒸気を用いた噴流実験

本章では蒸気を用いて実施した実験結果について述べる。

#### 3.2.5.1. 冷水中での蒸気挙動

図 3-89 に水温 17.85℃の冷水中にバルブ開放した時の内径 6mm のノズルから蒸気を放出した可視化画像である。図 3-90 に水温 12.6℃の冷水中にバルブ開放した時の内径 10mm のノズルから蒸気を放出した可視化画像である。図 3-91 に水温 19.95℃の冷水中にバルブ開放し時間が経過し定常状態になった時の内径 6mm のノズルから蒸気を放出した可視化画像である。図 3-92 に水温 19.95℃の冷水中にバルブ開放し時間が経過し定常状態になった時の内径 10mm のノズルから蒸気を放出した可視化画像である。ノズル開放瞬間では凝縮が起こらない非凝縮性ガスがノズルや蒸気発生器含まれていると考えられる。定常状態になってからは、ノズルから一定距離で凝縮が発生した。

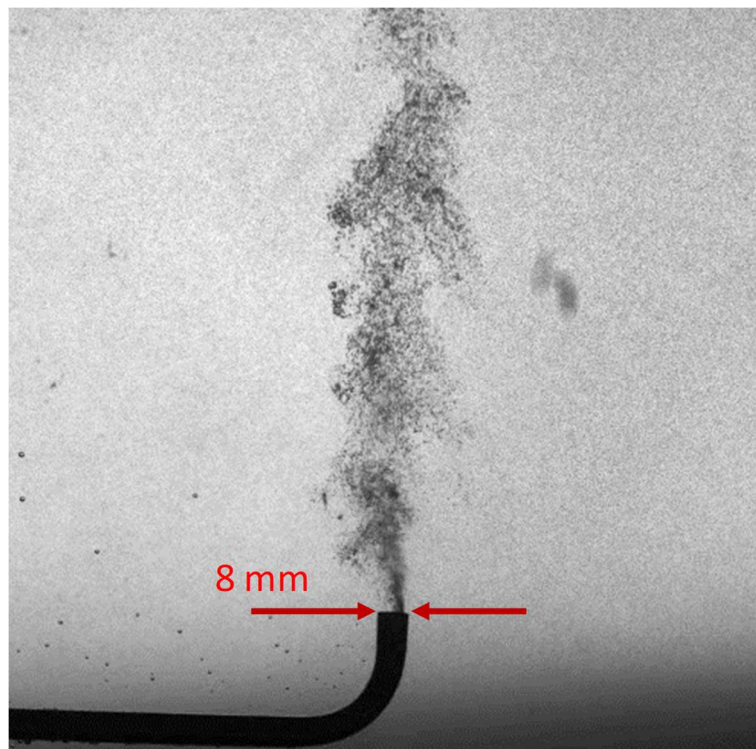


図 3-89 ノズル内径 6mm のバルブ開放時の可視化画像

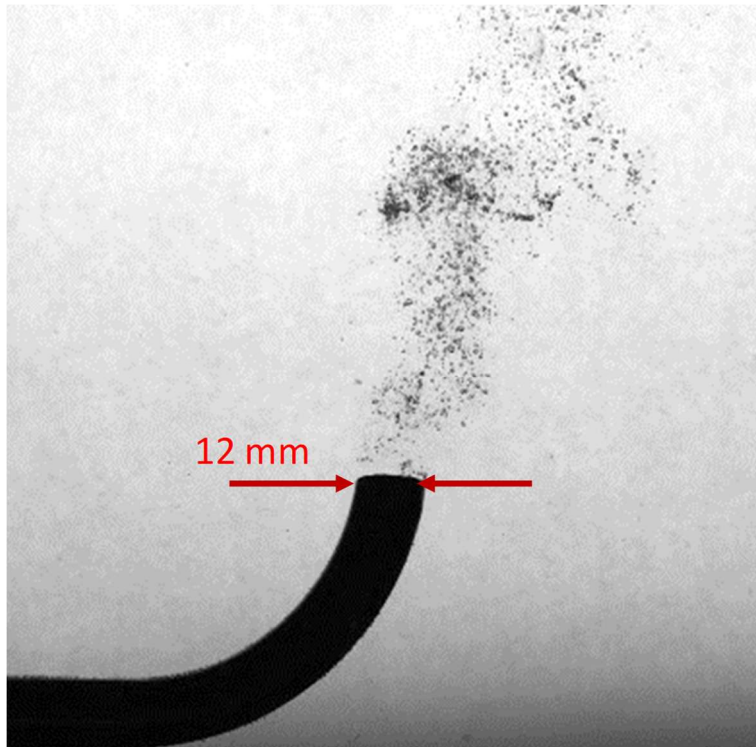


図 3-90 ノズル内径 10mm のバルブ開放時の可視化画像

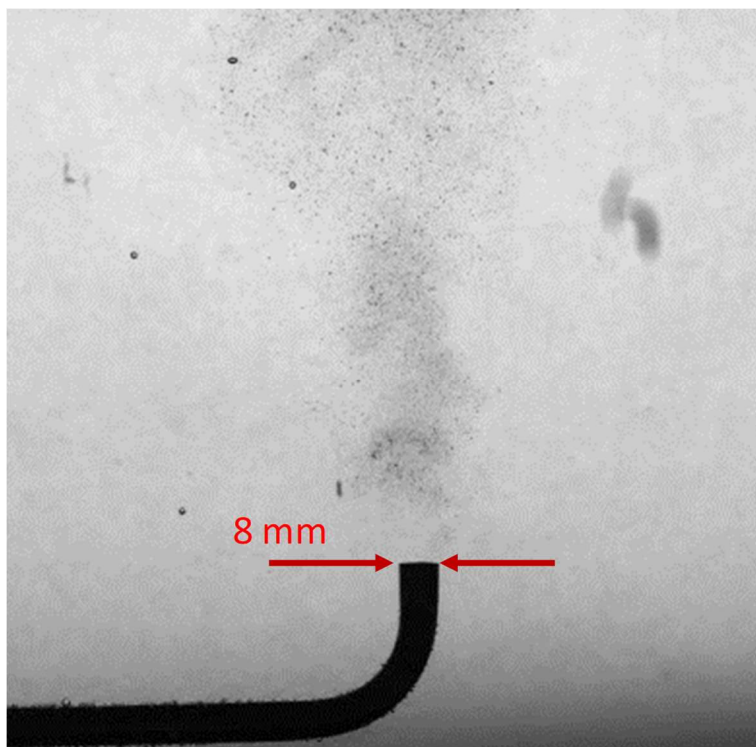


図 3-91 ノズル内径 6mm の定常時の可視化画像



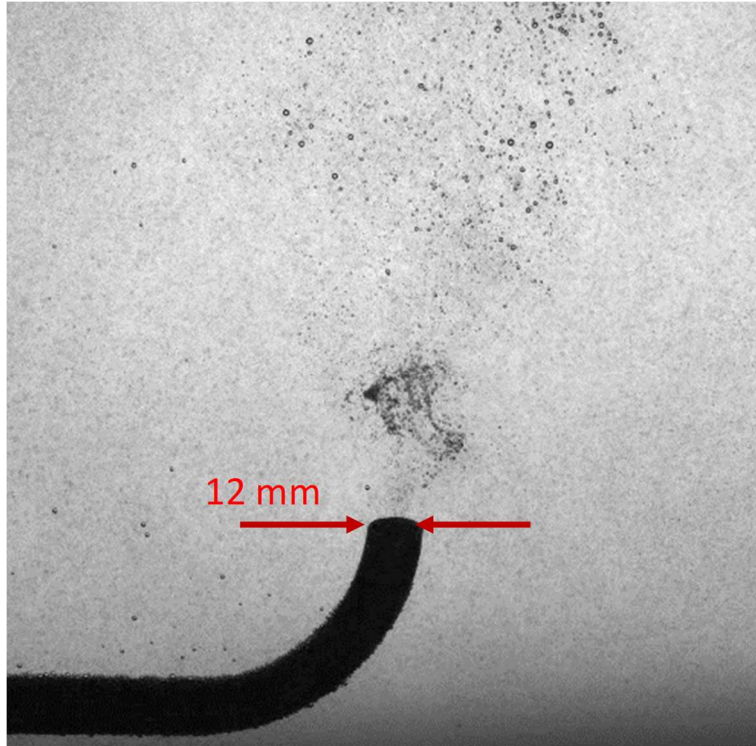


図 3-92 ノズル内径 10mm の定常時の可視化画像

### 3.2.5.2. 温水中の蒸気挙動

図 3-93 に水温  $63.55^{\circ}\text{C}$  の温水中にバルブ開放した時の内径  $6\text{mm}$  のノズルから蒸気を放出した可視化画像である。図 3-90 に水温  $78.6^{\circ}\text{C}$  の温水中にバルブ開放した時の内径  $10\text{mm}$  のノズルから蒸気を放出した可視化画像である。図 3-91 に水温  $62.15^{\circ}\text{C}$  の温水中にバルブ開放し時間が経過し定常状態になった時の内径  $6\text{mm}$  のノズルから蒸気を放出した可視化画像である。図 3-92 に水温  $78.05^{\circ}\text{C}$  の温水中にバルブ開放し時間が経過し定常状態になった時の内径  $10\text{mm}$  のノズルから蒸気を放出した可視化画像である。冷水条件と同じくバルブ開放状態は非凝縮性ガスが多く含まれている事が確認出来る。また、今回の実験では脱気を行えていないため水中の溶存酸素が溶け出し温水を使っている条件では非凝縮性ガスが発生する事があった、今後は脱気を検討する必要がある。加えて、蒸気とエアロゾルを混合する方法、エアロゾルを加熱する方法の提案が今後の課題と言える。

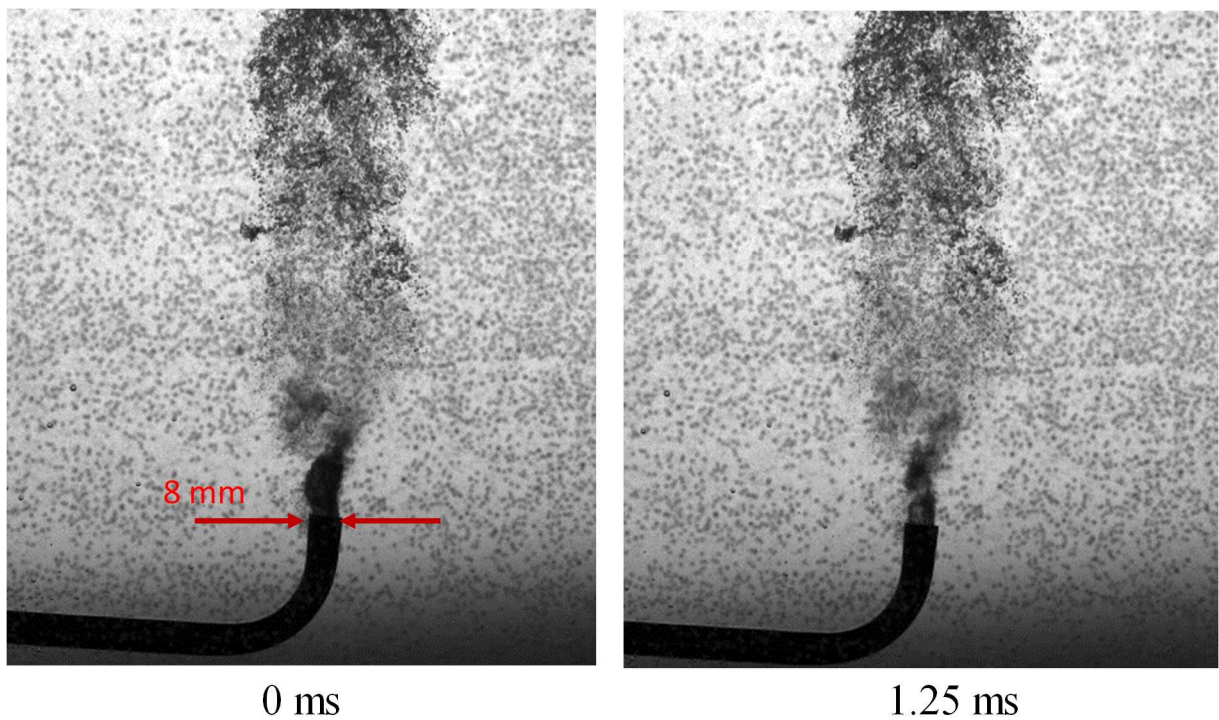
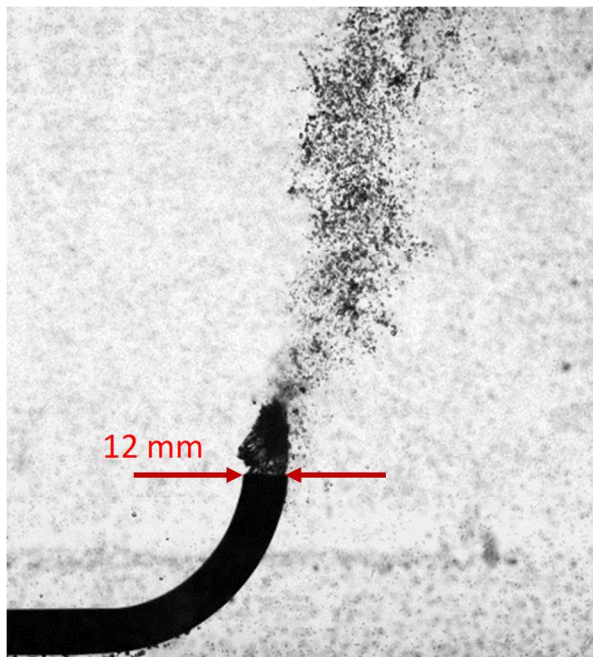
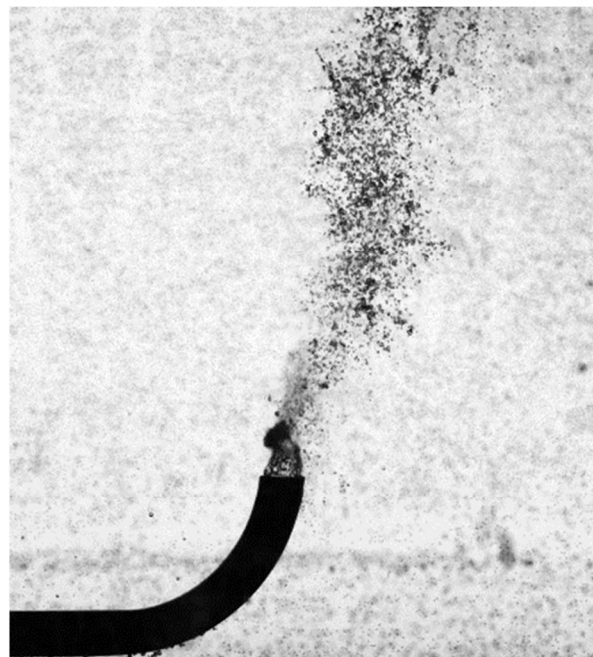


図 3-93 ノズル内径  $6\text{mm}$  のバルブ開放時の可視化画像



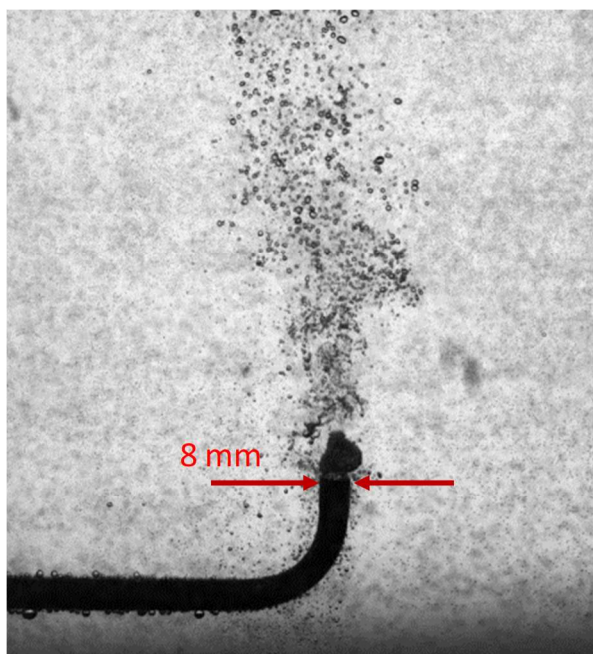


0 ms

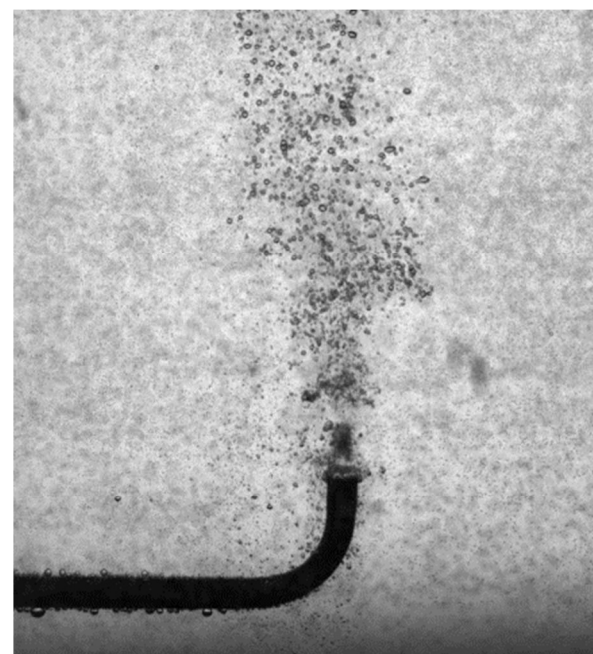


2.0 ms

図 3-94 ノズル内径 10mm のバルブ開放時の可視化画像

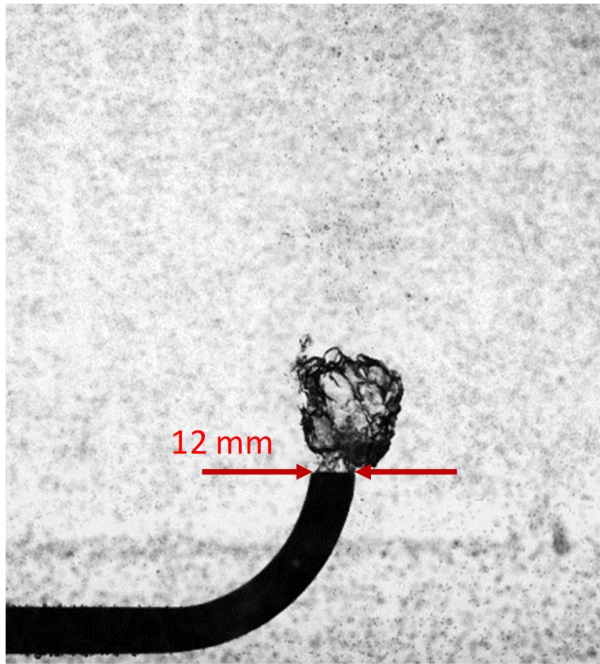


0 ms

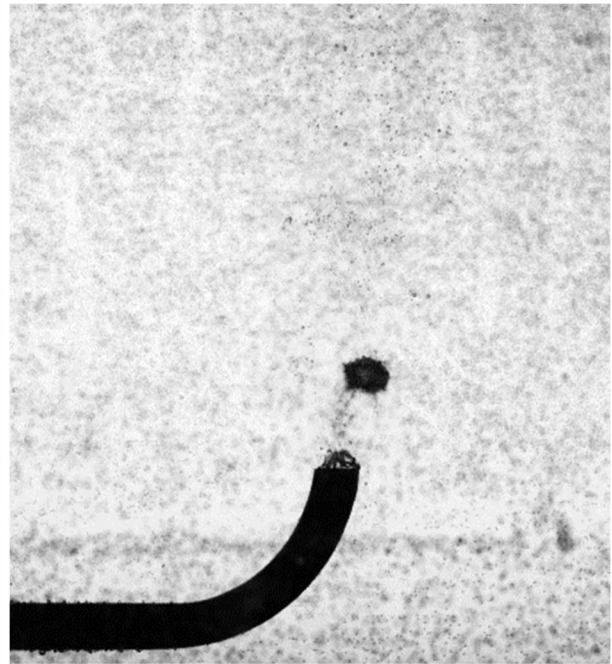


1.075ms

図 3-95 ノズル内径 6mm の定常時の可視化画像



0 ms



3.125 ms

図 3-96 ノズル内径 10mm の定常時の可視化画像

### 3.2.5.3. ノズル出口領域における蒸気-空気混合気相噴流の可視化

水温 55°C 程度の水中に内径 4 mm のノズルを通じて蒸気と空気を混合したガスを噴射した。この噴流を高速カメラによる可視化観察と WMS による気泡径分布計測を行いました。また、蒸気のみおよび空気のみを噴射した場合との比較を行った。

図 3-97 に示したのは蒸気のみを水中へ噴射した画像である。蒸気噴流はノズル出口で凝縮している。図 3-98 には空気流量 50 L/min で噴射した画像を示す。また図 3-99 には蒸気と空気を混合したガスを噴射した画像を示す。図 3-98 と図 3-99 を比較すると、空気のみを噴射よりも蒸気と空気を混合した噴流の方が微細な気泡が多く存在している様子が確認できる。

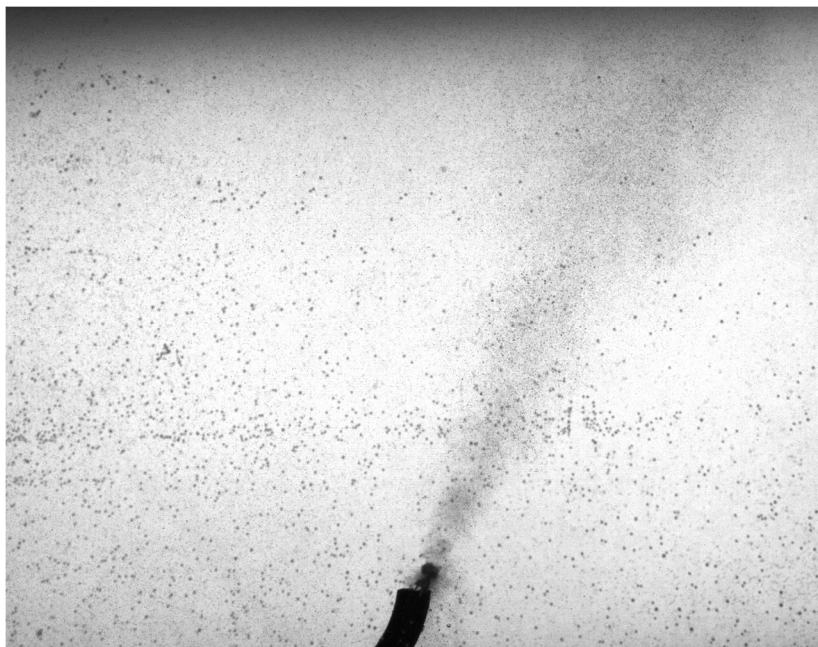


図 3-97 ノズル先端における蒸気噴流  
(ノズル内径 4 mm, 蒸気吐出圧 0.14MPa, 水温 55°C)



図 3-98 ノズル先端における空気噴流  
(ノズル内径 4 mm, 空気流量 50 L/min, 水温 55°C)



図 3-99 ノズル先端における蒸気-空気混合気相噴流  
(ノズル内径 4 mm, 蒸気吐出圧 0.14MPa, 空気流量 50 L/min 水温 55°C)



### 3.2.5.4. 下流における蒸気-空気混合気相噴流計測

ノズル先端から 500 mm 下流における噴流を WMS により計測し、気泡径分布を計測した。図 3-100 に空気噴流および蒸気-空気混合気相噴流の体積割合における気泡径分布を示す。空気の場合に比べて蒸気を含む場合には小さな気泡の割合が高いことがわかる。これはノズル先端における蒸気の凝縮挙動により気相噴流の微細な気泡への分裂が促進されたことによると考えられる。

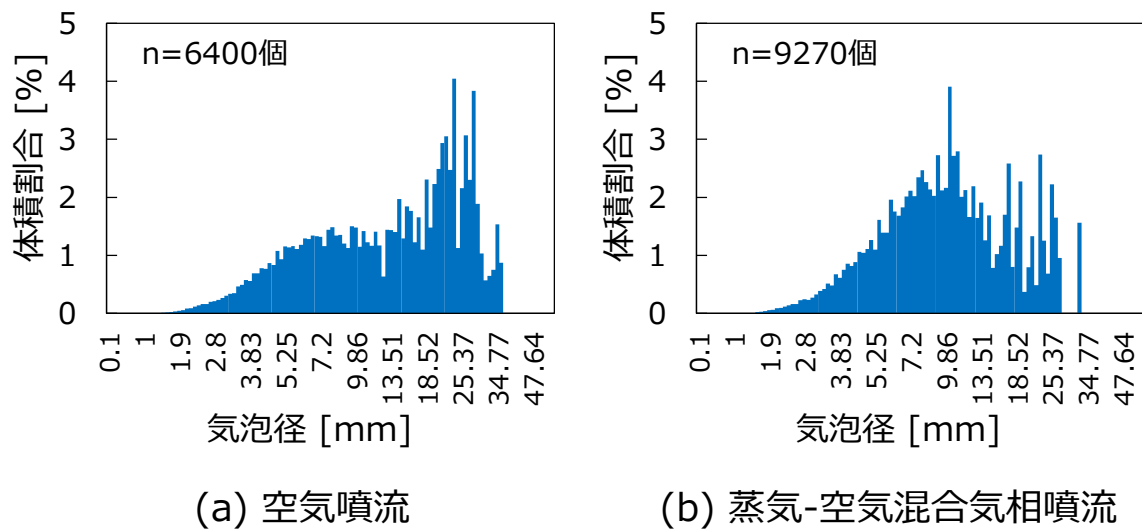


図 3-100 蒸気噴流気泡径分布比較

### 3.2.6. MELCOR モデルとの比較

本章では MELCOR モデル中で使用される計算式で算出される結果と実験により計測された結果を比較する。

#### 3.2.6.1. 気泡径に対するアスペクト比の比較

気泡のアスペクト比に関して、実験結果と先行研究、MELCOR モデルとの比較を行った。図 3-101 に比較結果を示す。青い点でプロットしたものが 3.2.4.2 章で計測した大気泡に関するアスペクト比である。MELCOR モデルではスウォーム上昇領域における気泡のアスペクト比  $a/b$  を以下の式で定義している。図 3-101 には実線で示した。 $d_B$  は気泡径である。

$$\frac{a}{b} = \begin{cases} 1 & (d_B < 0.15 \text{ cm}) \\ 0.817 + 1.13466d_B - 0.3795d_B^2 & (0.15 < d_B < 1.3 \text{ cm}) \\ 1.675 & (d_B > 1.3 \text{ cm}) \end{cases} \quad (34) \quad \text{ま}$$

た Wellek らの単一気泡のアスペクト比に関する実験式は以下のように表される (Wellek et al., 1966)。図 3-101 には破線で示した。

$$\frac{a}{b} = \frac{1}{1 + 0.163E_o^{0.757}} \quad (35)$$

ただし、 $E_o$  数は以下の式で表される。 $g$  は重力加速度、 $\rho_L$  は液相密度、 $\rho_g$  は気相密度、 $\sigma$  は表面張力である。

$$E_o = \frac{g(\rho_L - \rho_g)d_B^2}{\sigma} \quad (36)$$

山本らはノズル先端から 100 ~ 800 mm の位置で可視化画像を用いて気泡のアスペクト比を計測した。 $z = 800 \text{ mm}$  の位置でのアスペクト比の計測結果を図 3-101 に赤い点で示す (Yammoto et al., 2016)。

まず実験結果と MELCOR モデルの式を比較する。スウォーム上昇領域において MELCOR モデルが想定する同程度の大きさの気泡に比べると、ノズル先端で形成された大気泡はより真球に近い形状をしていることが示唆された。また山本らの結果と比較しても真球に近い形状をしている傾向が確認できる。

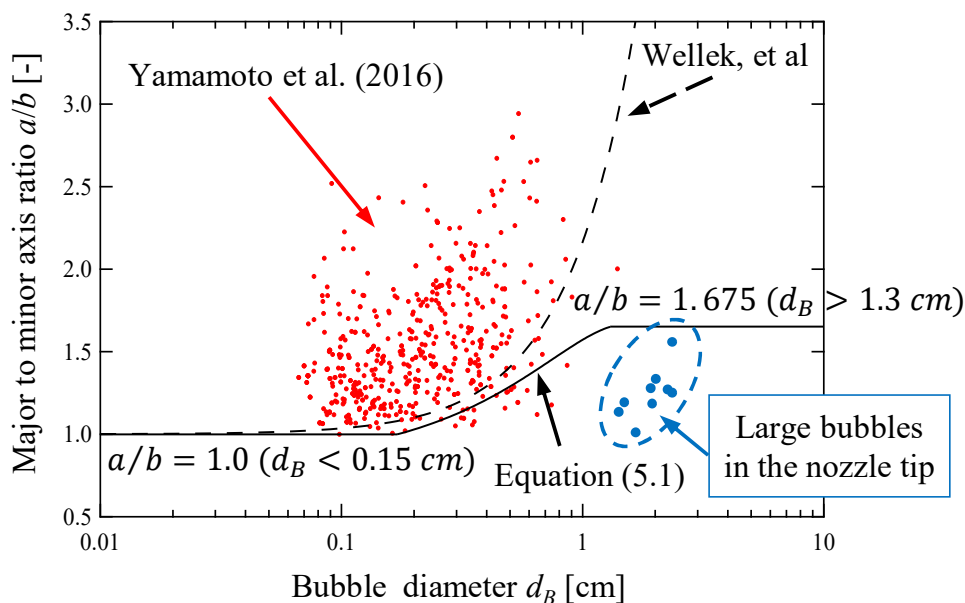


図 3-101 気泡のアスペクト比の比較  
(MELCOR : 実線, Wellek ら : 破線, 山本ら : 赤点, 計測値 : 青点)

### 3.2.6.2. 大気泡径に関するモデルと計測結果の比較

MELCOR モデルにおいて初期グローブジュール径  $d_{g,o}$  の計算式が以下のように定義されている。  $V_n$  は無次元化されたグローブジュール体積，  $D_{in}$  はノズルの内径である。

$$d_{g,o} = \sqrt[3]{\frac{3}{2} V_n D_{in}^2 \left( \frac{\sigma}{\rho_L g} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (37)$$

グローブジュールの無次元体積はベント管形状係数  $A, B$  と  $We$  数を用いて以下のように定義される。ベント管形状係数は表 3-1 表 3-13 に示す 3 種類のベント管形状についてそれぞれ定義されている (R. O. Gauntt et al., 2000)。

$$V_n = A We^B \quad (38)$$

また  $We$  数はベント出口での気相速度  $v_n$  を用いて以下のように定義される。  $We$  数は慣性力と表面張力の比を表す無次元数であり，気泡の形成などにおいて支配的なパラメータとなるとされている。

$$We = \frac{\rho_L D_{in} v_n^2}{\sigma} \quad (39)$$

まず3種類のベント管形状係数をそれぞれ用いて計算した結果と3.2.4.2章で算出した等価直径を比較した。その結果を図3-102に示す。これを見るとMultiple small holesのベント管形状係数を用いて計算したグローブール径と等価直径が最も一致していた。さらに3.2.4.3章で算出した等価直径と3種類のベント管形状係数を用いて計算したグローブール径を比較した。その結果を図3-103に示す。こちらの結果もMultiple small holesのベント管形状係数を用いて計算したグローブール径と等価直径が最も一致していた。高流量になるに従って、等価直径の平均値とMultiple small holesのグローブール径との差は小さくなり、一方その他の2種類との差が拡大している。これは高流量になりより実機条件に近づいているためではないかと考えられる。

表3-14に式(23)により導出したMultiple small holesのグローブール径を示す。

表 3-13 ベント管形状係数

Vent type	A	B
Multiple small holes	3.45	0.46
Downcomer	0.0891	0.616
Horizontal vent	0.857	0.73

表 3-14 MELCORにおける計算式(5.4)から算出した初期グローブール径 $d_{g,o}$   
( $Q_{air}=10, 50, 100$  L/min,  $D_{in}=10$  mm)

$Q_{air}$ [L/min]	$d_{g,o}$ [mm]
10	30.0
50	49.2
100	60.7



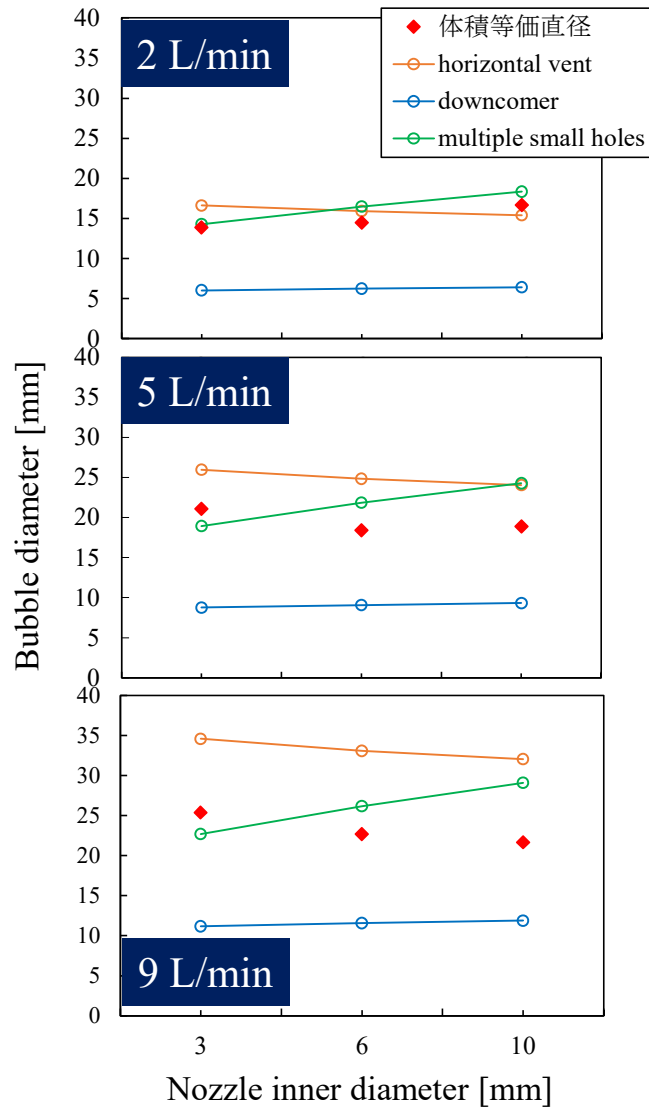


図 3-102 低流量時の 3 種類のベント管形状係数による初期グローブール径と等価直径比較( $Q_{air}=2, 5, 9$  L/min,  $D_{in}=3, 6, 10$  mm)

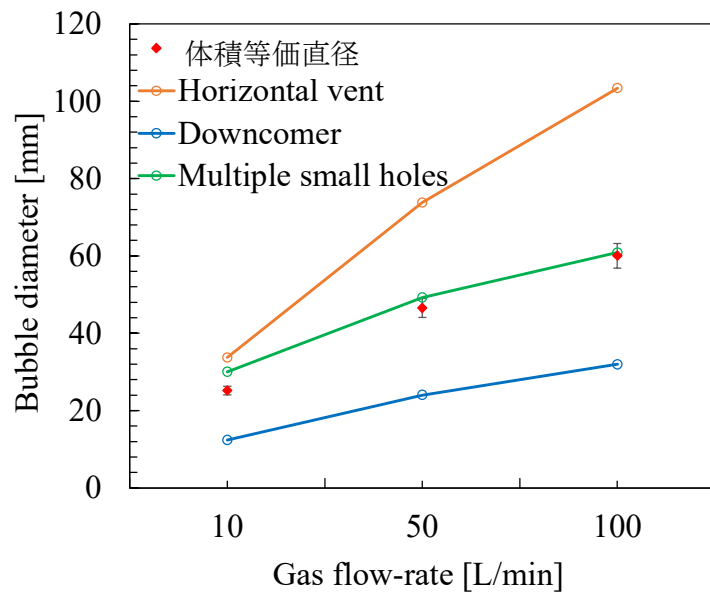


図 3-103 中高流量時の 3 種類のベント管形状係数による初期グローブール径と等価直径比較( $Q_{air}= 10, 50, 100$  L/min,  $D_{in}= 10$  mm)

### 3.2.6.3. 大気泡の分裂領域の推定

また MELCOR モデルにおいては、グロービュールが初期グロービュール径の 12 倍の距離上昇する間に安定した気泡に分裂し終わるとされている。上昇中のグロービュール径 $d_g$ は線形に減少するとされ、以下の式で表される。 $z$ はノズル先端を 0 mm としたときの鉛直方向距離である。

$$d_g = d_{g,o} \left[ 1 - \frac{z}{12d_{g,o}} \right] \quad (40)$$

MELCOR モデルではスウォーム上昇領域において、気泡は等価直径 7 mm の扁平楕円体として定義されている。つまりベント管出口領域で形成されたグロービュールは分裂して直径 7 mm 程度の小気泡に分裂するとされている。まず図 3-104 には図 3-77 に補助線を書き加えたものを示す。黒の破線は気泡径 7 mm を示している。また橙色と緑の実線はそれぞれ式 (23) により導出したグロービュール径と平均等価直径を示している。図 3-105 には式 (23)により算出した初期グロービュール径を式 (26) に代入し、分裂が終了するまでの気泡径の推移と分裂が終了すると想定される距離を算出した結果を実線で示す。また、平均等価直径を代入した場合についても図 3-105 に同様に実線で示す。また図 3-104 に示した気泡径分布における小気泡径のピーク値も図 3-105 に流量ごとにプロットした。

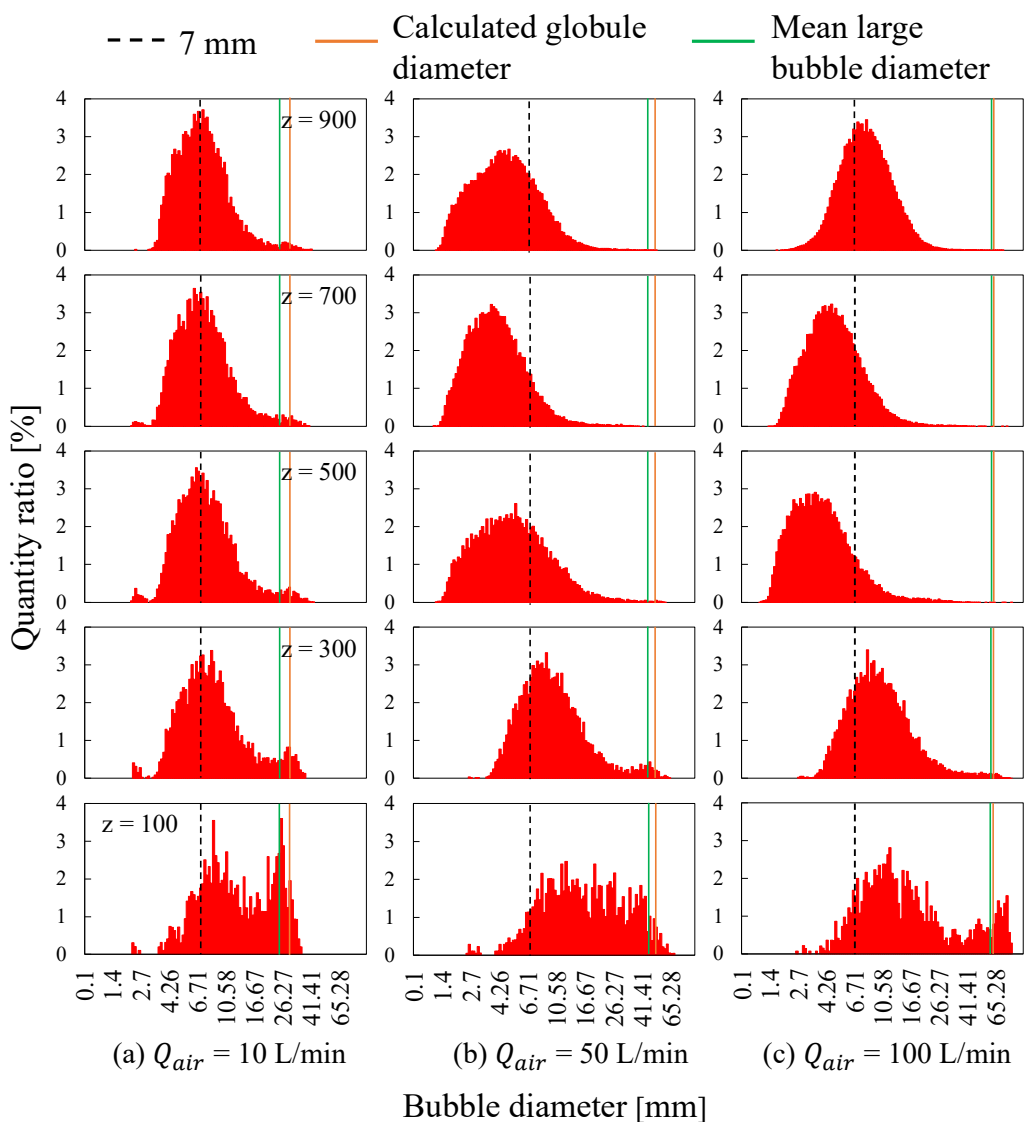


図 3-104 気泡径分布と等価直径の比較  
 ( $Q_{air} = 10, 50, 100$  L/min,  $D_{in} = 10$  mm,  $z = 100, 300, 500, 700, 900$  mm)

まず流量ごとに図 3-104, 図 3-105 グロビュール分裂高さとおおむね小気泡ピーク値を見ていく。  
 $Q_{air} = 10$  L/min では  $z = 100$  mm においては約 8 mm と約 25 mm の位置にピークが存在する。2つのピークのうち大きい方のピーク値はノズル先端において計測された大気泡径に近い値を示している。計測位置が高くなるに従って 25 mm 付近のピークは消える。  $z = 500$  mm 以上では 25 mm 付近のピークに大きな差は見られない。これらの様子から  $z = 300 \sim 500$  mm の間にグロビュールの分裂がおおむね完了していることが推測される。これは図 3-105 に示す式 (26) による計算結果とおおむね一致している。

$Q_{air} = 50$  L/min では  $z = 100$  mm において顕著なピークは見られないが  $z = 300$  mm では約 8 mm の位置にピークが立ち、50 mm 前後の気泡分布はほとんど見られなくなっている。さらに  $z = 500$  mm 以上では約 5 mm の位置にピークが立っている。  $z = 500 \sim 700$  mm の間にピーク値がより小

さい方へのシフトが収束していることから、 $z=500 \sim 700$  mm の間にグローブールの分裂が完了していると推測される。これも式 (26) による計算結果とおおむね一致している。

$Q_{air} = 100$  L/min では  $z = 100$  mm において約 10 mm と 75 mm の位置にピークが存在するが、それより下流では大気泡の分布はほとんどない。 $Q_{air} = 50$  L/min の時と同様に  $z = 300 \sim 500$  mm の間で気泡径のピークがより小さい方向へシフトしている。また分布形状の違いから  $z = 500 \sim 700$  mm の間にグローブールの分裂が完了していると推測される。これは式 (26) による計算結果よりも低い位置で分裂が完了している可能性がある。なお、 $z = 900$  mm で気泡径分布が大きい方へとシフトしているが、これは高流量により水面が激しく跳ね上がることによって生成された気泡が含まれるためであると考えられる。

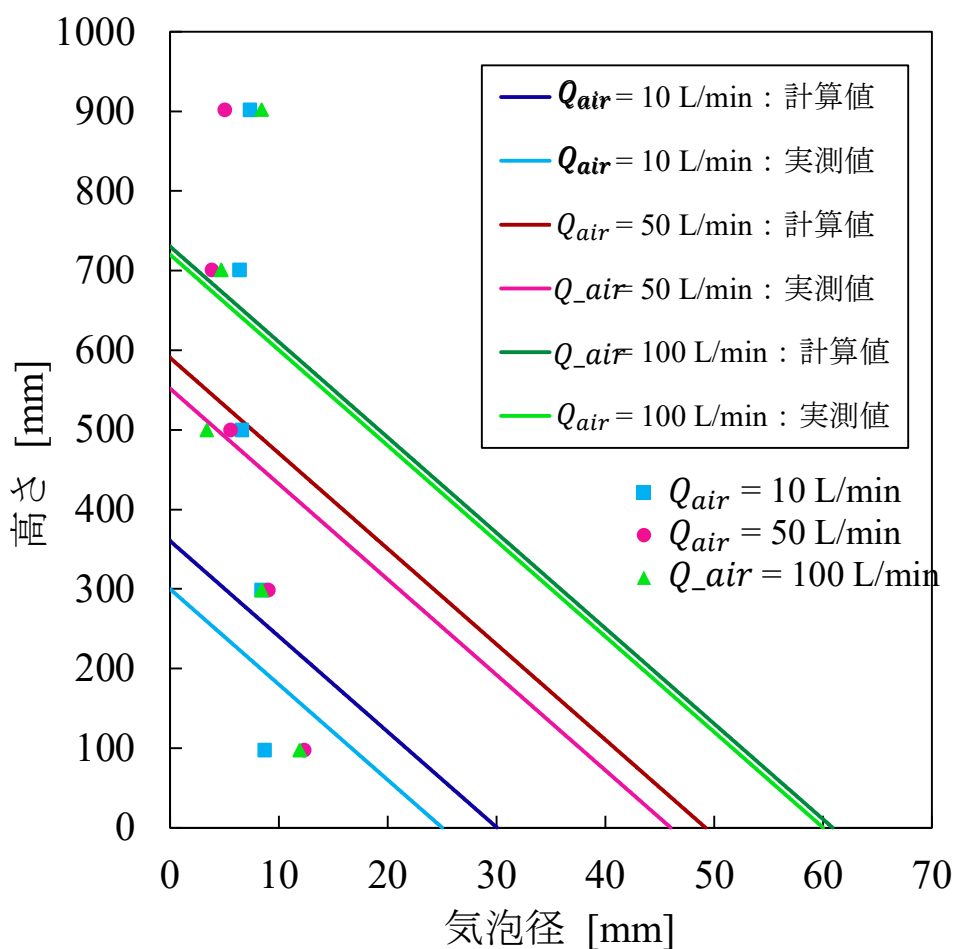


図 3-105 グロブール分裂高さとお気泡ピーク値  
 $(Q_{air} = 10, 50, 100$  L/min,  $D_{in} = 10$  mm,  $z = 100, 300, 500, 700, 900$  mm,  
 式(26) : 実線, 気泡径分布ピーク値 : プロット)

さらに図 3-104 に示した気泡径分布をそれぞれの高さ・流量ごとに相加平均したものと式(26)により算出されるグローブユール分裂が終了する高さを比較することで、実際にグローブユールが分裂を終えると推定される高さとモデル内で計算される高さについて考察する。また表 3-12 に示したノズル先端における大気泡の等価直径を高さ 0 mm の位置にプロットした。スウォーム上昇領域を上昇する気泡は 7 mm 程度の小気泡であると想定されている。

図 3-106 における黄色のプロットおよび実線を見ると、流量 10 L/min では平均気泡径が 7 mm 程度に収束するのが計算される高さよりもやや高い位置にあることがわかる。赤色のプロットおよび実線を見ると、流量 50 L/min では平均気泡径分布が 7 mm 程度に収束する高さと計算される高さがおおむね一致している。青色のプロットおよび実線を見ると、流量 100 L/min では平均気泡径分布が 7 mm 程度に収束する高さは計算される高さより低い位置にきていることがわかる。

モデルでは線形的にグローブユール径が減少するとされているが、平均気泡径の高さ方向の推移をみるとノズル出口に近い領域で急激に分裂するように推移している。また高流量条件ではモデルにおいて想定されるよりも低い領域でグローブユールの分裂が終了し、スウォーム上昇領域に移行している可能性がある。

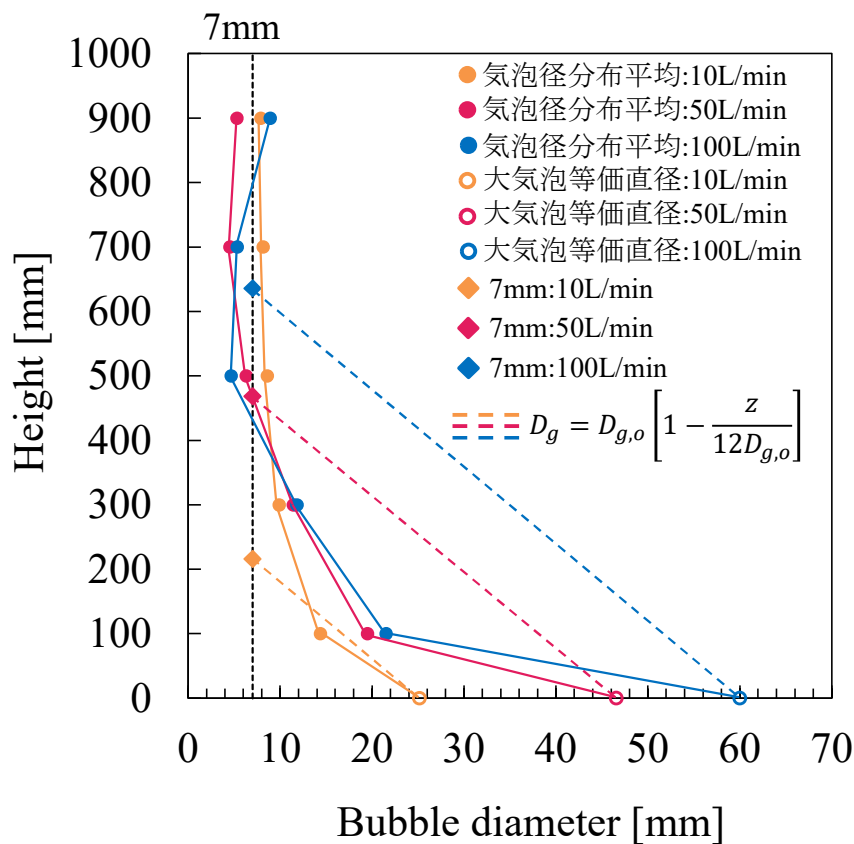


図 3-106 グロブユール分裂高さと平均気泡径  
 ( $Q_{air} = 10, 50, 100$  L/min,  $D_{in} = 10$  mm,  $z = 100, 300, 500, 700, 900$  mm,  
 式(26) : 破線, 平均気泡径 : 丸プロット, 平均大気泡径 : 菱形プロット)

### 3.2.7. エアロゾルを含まない二相流挙動に関するまとめ

本研究は、プールスクラビングに関する既存の解析コードにおけるモデルの妥当性確認のため、メカニズム解明において重要となる気液二相流挙動および温度成層化の影響を把握することを目的として、気相噴流の可視化および WMS による噴流挙動計測を実施した。以下のような知見を得た。

#### (1) 気相噴流挙動

- ノズル流速を一定にした条件下では、気相流量が高流量であるほど中心部の気相密度が高くなり、噴流幅がより広くなる傾向が確認された。
- 気相流量を一定にした条件下では、ノズル流速によらず同程度の噴流幅をもつことが確認された。
- ノズル流速一定条件と気相流量一定条件での噴流挙動を比較した結果、気相噴流全体の挙動はノズル出口における流速ではなく供給される気相流量に大きく依存することが示唆された。
- ノズル流速一定条件と気相流量一定条件でのボイド率分布の傾向を比較した。ノズル流速一定条件ではボイド率分布のピーク値や分布幅に相違が見られるのに対し、気相流量一定時にはピーク値や分布幅が一致している傾向が確認された。
- 気相上昇速度はノズル流速ではなく気相流量に依存して推移することが確認された。
- 気泡径分布を測定した結果、下流において収束する気泡径のピークが流量によって差が生じることが確認された。
- 本実験体系において温度成層を形成することが可能であることを確認した。温度成層が形成された条件下で噴流の計測を行った。温度成層のパターンや水槽内の混合状態の違いによる気相噴流挙動の有意な差は確認されなかった。

#### (2) ノズル先端における大気泡形成

- ノズル先端では大気泡が形成され、その大気泡がノズルを離脱後、気泡底部から気柱が貫くような挙動が断続的に繰り返されているのが観測された。大気泡の大きさは気相流量よりもノズル径に大きく依存していることが確認された。

#### (3) MELCOR モデルとの比較

- MELCOR モデルがスウォーム上昇領域で想定する同程度の大きさの気泡に比べると、ノズル先端で形成された大気泡はより真球に近い形状をしていることが示唆された。
- MELCOR モデルにおける初期グローブ径計算式により Multiple small holes のベント管形状係数を用いて算出した気泡径とノズル先端で計測された大気泡径は良好な一致を示した。今後、本実験体系において DF 計測を行い MELCOR モデルと比較をする際には Multiple small holes のベント管形状係数を採用するのが適切であると考えられる。
- 高流量条件においては MELCOR モデルが想定するよりも低い位置でグローブ分裂が終了している可能性が示唆された。

### 3.2.8. エアロゾルを用いた際の二相流実験装置

図 3-107 に実験体系を示す．コンプレッサからバッファタンクに空気を貯め流量コントローラーからエアロゾル発生器を通し水槽中の静止水中に噴流として放出する．また，その際一部をエアロゾルスペクトルメータにてエアロゾルの濃度測定を行う．水槽には 2000mm に流動構造を計測する WMS が組み込まれている．

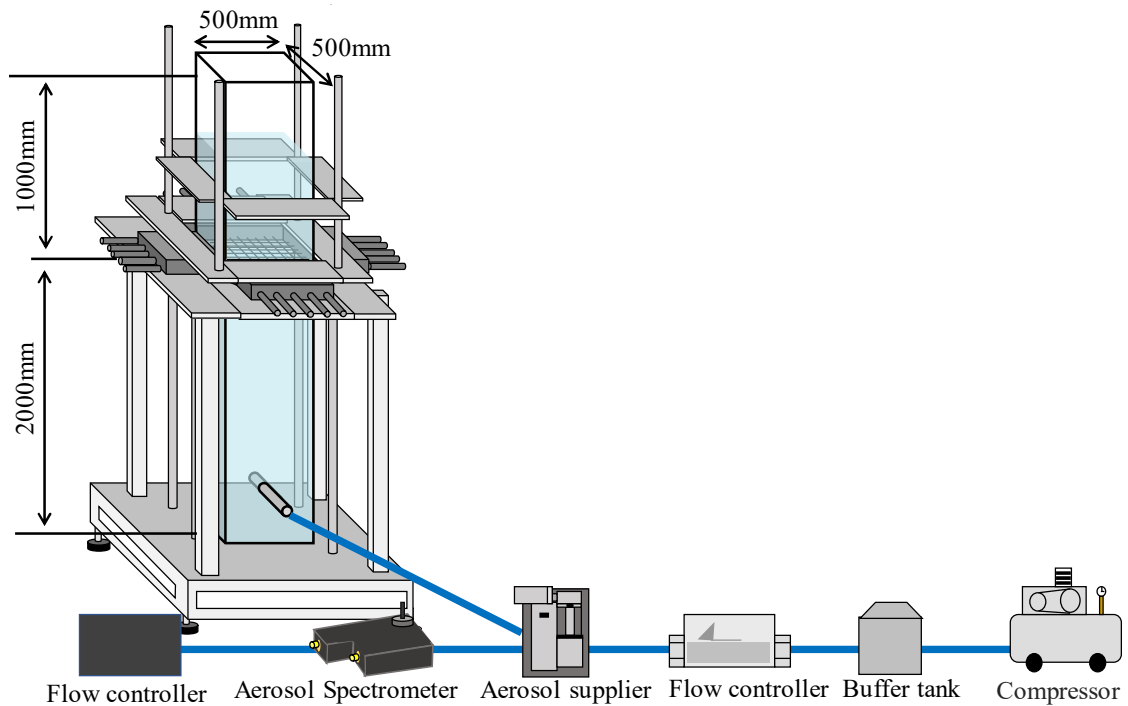


図 3-107 流動構造計測実験



### 3.2.9. 使用したエアロゾル粒子

図 3-108 にエアロゾルスペクトルメータにて計測を行った不溶性の代表径  $1.0\ \mu\text{m}$  単分散のアモルファスシリカの粒径分布を示す. 図 3-109 にエアロゾルスペクトルメータにて計測を行った不溶性の代表径  $0.4\ \mu\text{m}$  の硫酸バリウムの粒径分布を示す. 縦軸が計測した時間によって検出された粒子の数, 横軸が計測された粒子の粒径である. アモルファスシリカに比べ硫酸バリウムは個数が多い理由は粒子の濃度が均一でなかった為長時間の計測を行ったためである.

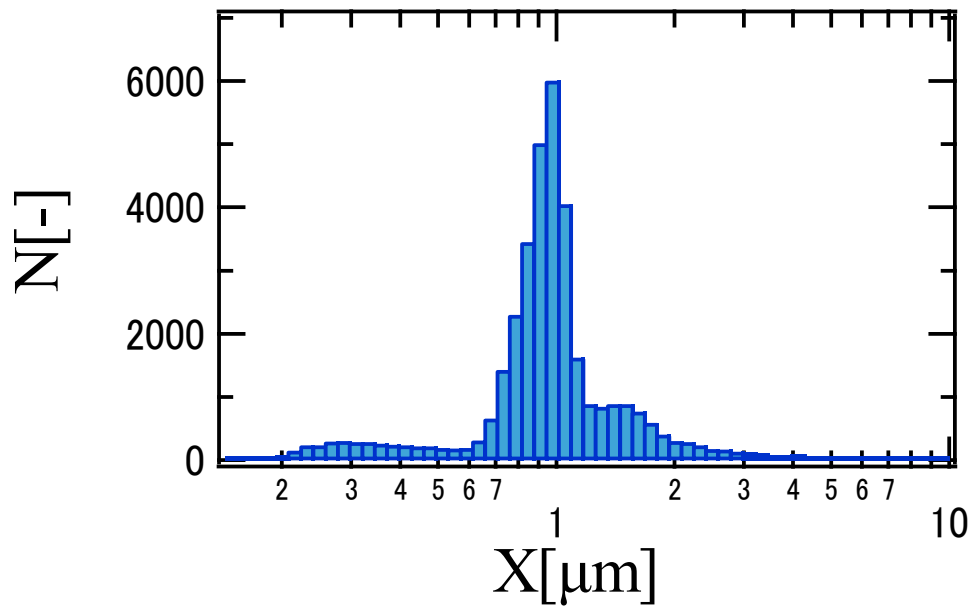


図 3-108 アモルファスシリカの粒径分布

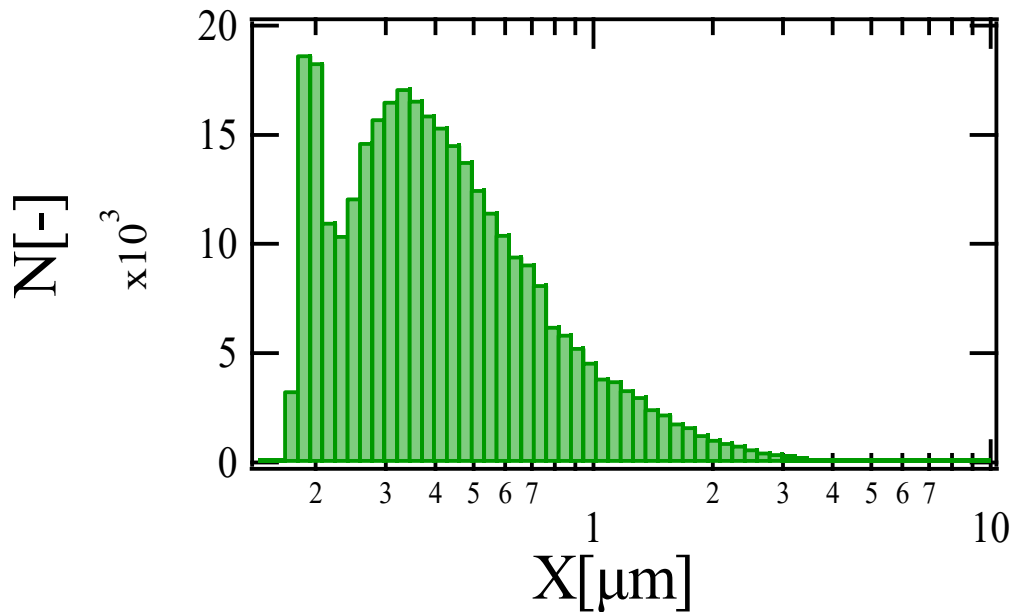


図 3-109 硫酸バリウムの粒径分布

### 3.2.10. ボイド率, 気相速度分布の評価

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 3-110 にノズル内径 6mm, 流量 60L/min, ノズル水位 1100mm の条件において, 空気単相のみでの WMS によって 10s 計測された時間平均の流動構造を示す. 図 3-111 にエアロゾル粒子に単分散代表径  $1\mu\text{m}$  のアモルファスシリカをしようした固気二相流での WMS によって 10s 計測された時間平均の流動構造を示す. それぞれノズルからの距離が 100, 300, 500, 700, 900 mm 間隔で WMS によって計測を行い噴流の流体構造, 三次元断面ボイド率, 気相速度の算出を行うことができた.

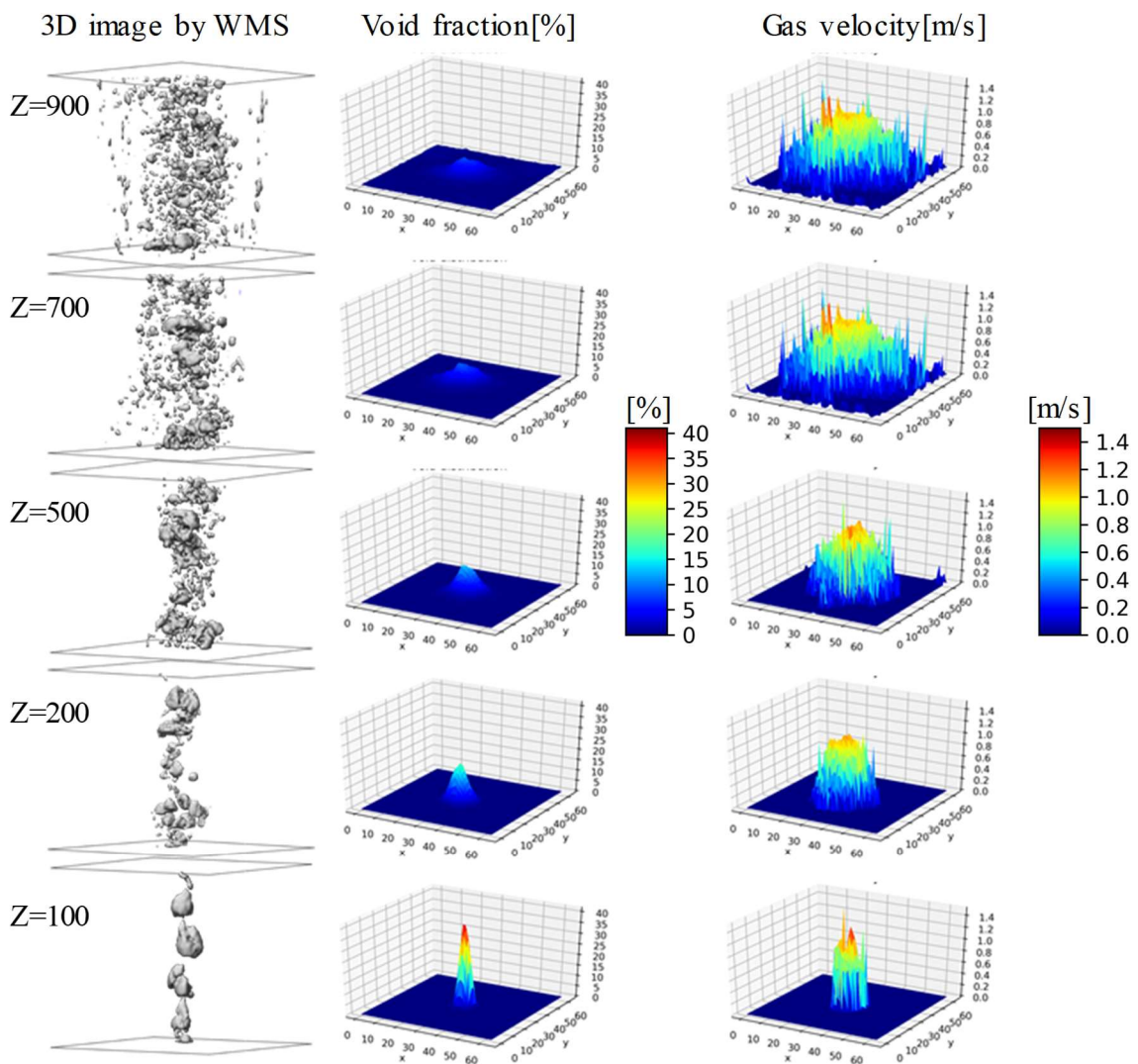


図 3-110 空気単相条件での三次元流動構造

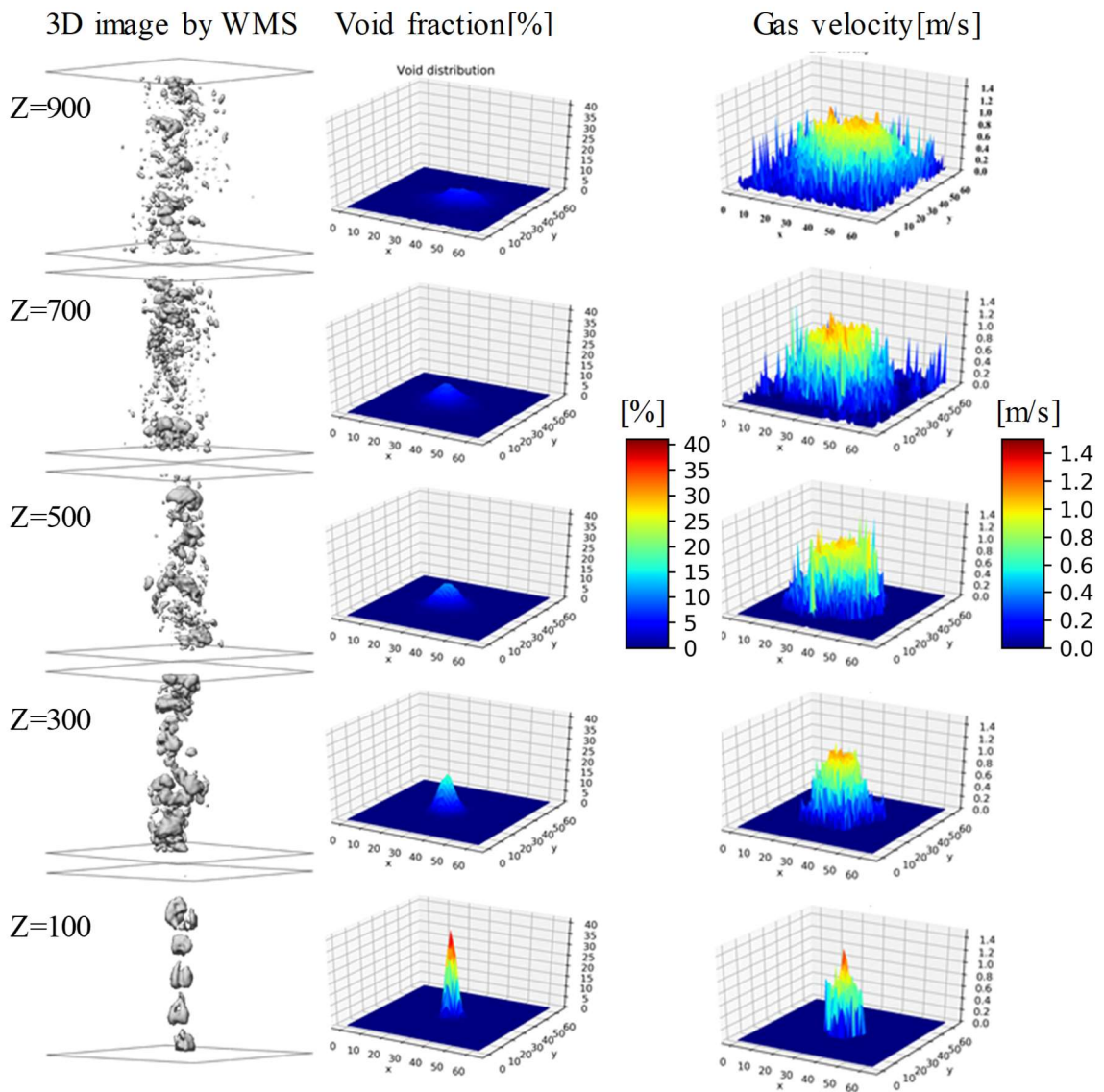


図 3-111 エアロゾル粒子を含む固気二相流条件での三次元流動構造

### 3.2.11. 流動構造の二次元評価

図 3-113 は同条件で流動構造を二次元表記したものである。赤いプロットが空気単相、青いプロットがエアロゾルにアモルファスシリカを用いた固気二相流である。左のグラフが使用したエアロゾルの時間あたりの質量濃度である。中央のグラフが 10s の時間平均ボイド率である。縦軸がボイド率、横軸は中心がノズル位置、左右が水槽の壁面である。右のグラフが 10s の時間平均気相速度である。縦軸がボイド率、横軸は中心がノズル位置、左右が水槽の壁面である。ノズルからの各距離のボイド率、気相速度の結果からノズルから離れるにつれボイド率、気相速度が周囲に伝わっていく様子が確認できる。更に、空気単相とエアロゾル粒子を含む固気二相流ではボイド率、気相速度の分布に大きな違いがないことが確認できた。更に流量を変え 30L/min にしたものが図 3-112 である、加えて 90L/min にしたものが図 3-114 である。これらの結果からエアロゾル粒子に不溶性の単分散代表径  $1\mu\text{m}$  のアモルファスシリカを使用した場合、流量によらずボイド率、気相速度の分布に違いは生じないという結果となった。

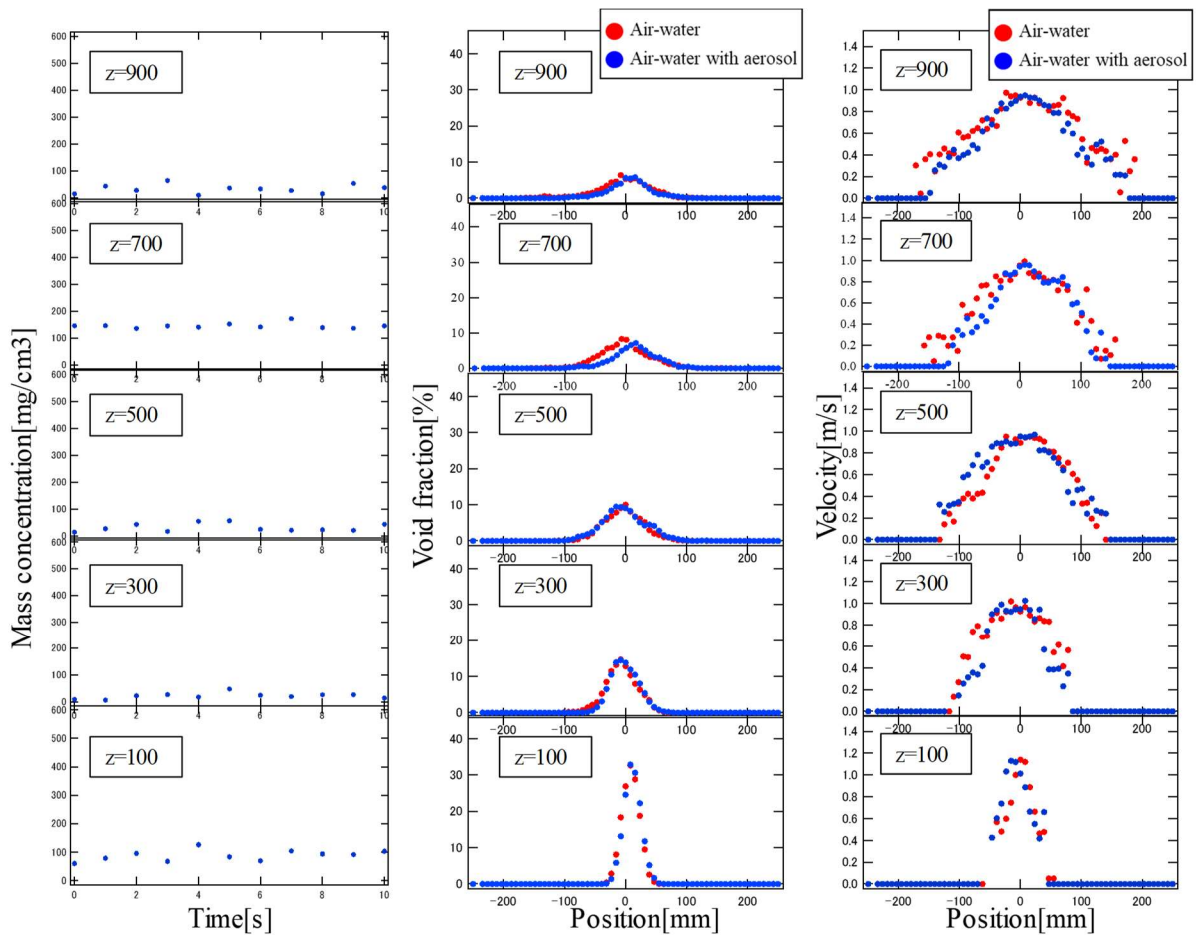


図 3-112 流量 30L/min 条件での高さ毎のボイド率、気相速度

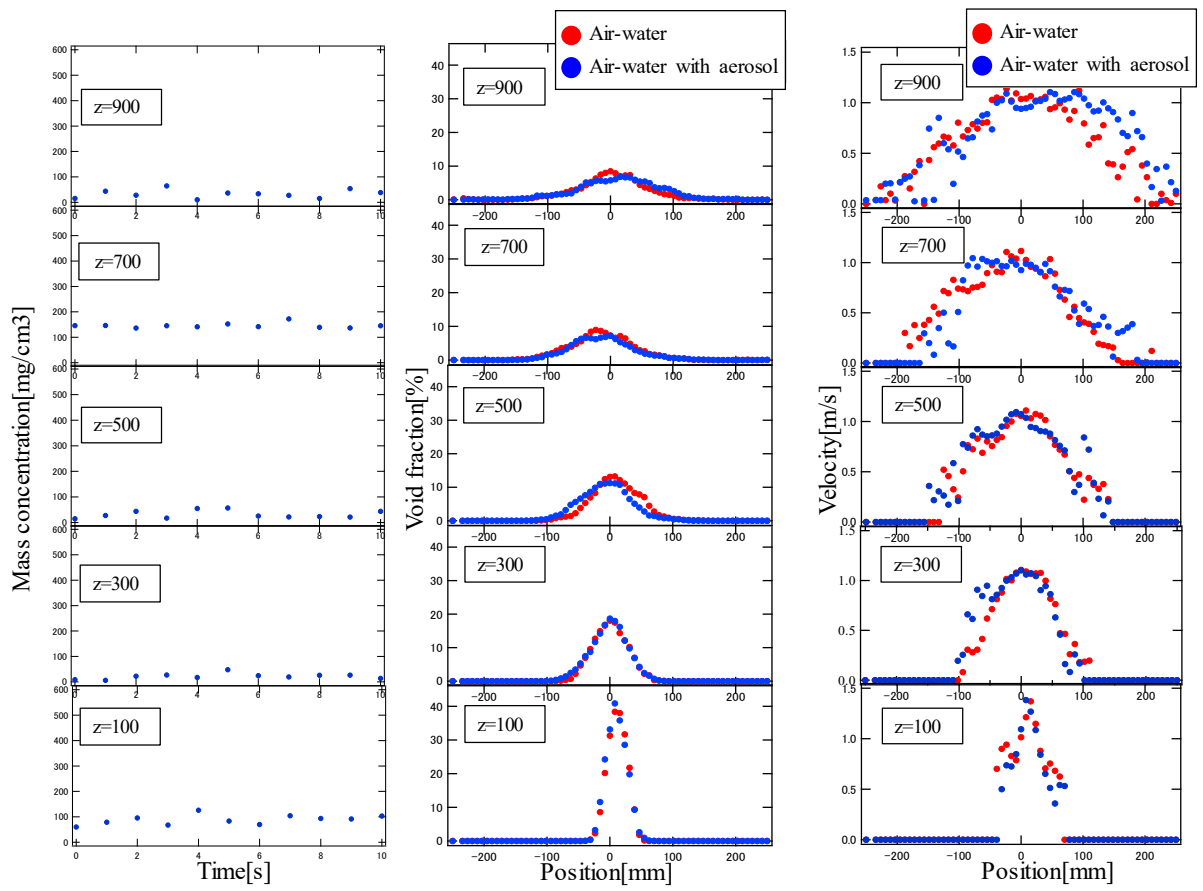


図 3-113 流量 60L/min 条件での高さ毎のボイド率，気相速度

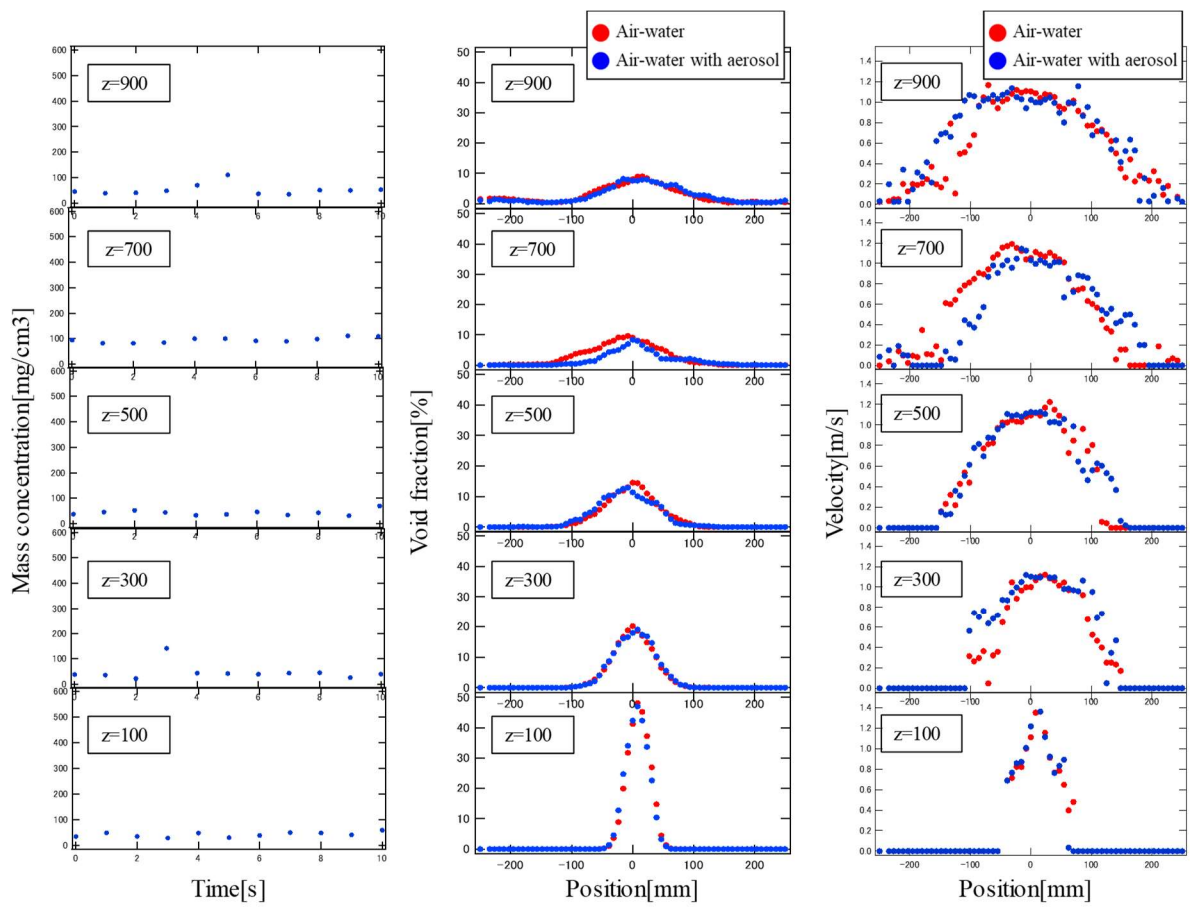


図 3-114 流量 90l/min 条件での高さ毎のボイド率，気相速度

### 3.2.12. エアロゾル濃度による影響

エアロゾルの個数濃度が均一でないのは発生器の仕組み上、粒子の分散が均一に起こらない為であり分散を均一にすることが今後の課題と言える。この際に粒子の濃度が与える影響を調べた。エアロゾル発生速度を 27 mm/h と 250 mm/h の条件で行った。図 3-115 に発生速度 27 mm/h 条件での時間あたりの個数濃度である。また、発生速度 250 mm/h 条件での時間あたりの個数濃度はセンサのレンジを超えるものであった為計測ができないものであった。図 3-116 にエアロゾル濃度による 10s の時間平均ボイド率の違いを示す。図 3-117 にエアロゾル濃度による 10s の時間平均気相速度の違いを示す。エアロゾル発生速度が 27 mm/h を青いプロット、250 mm/h が緑のプロットである。グラフから不溶性粒子の濃度による大きなボイド率分布、気相速度分布の違いは生じないことが確認できた。

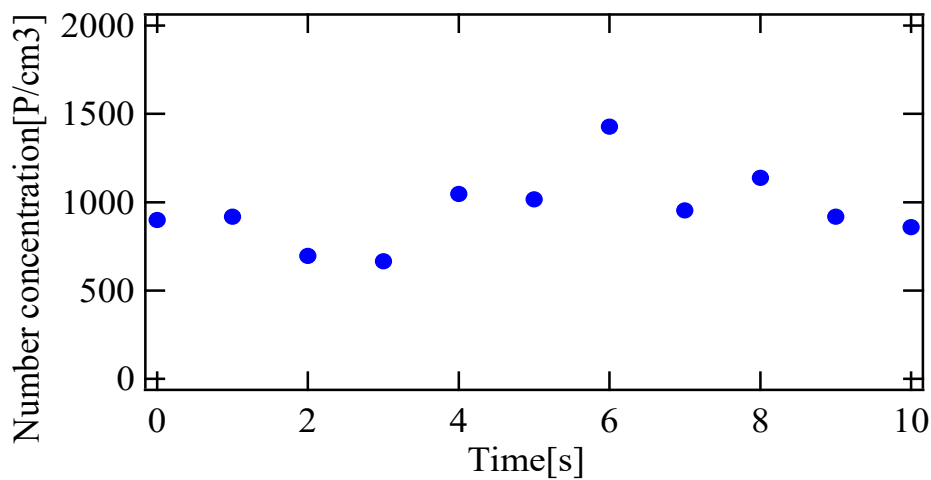


図 3-115 時間あたりの個数濃度変化

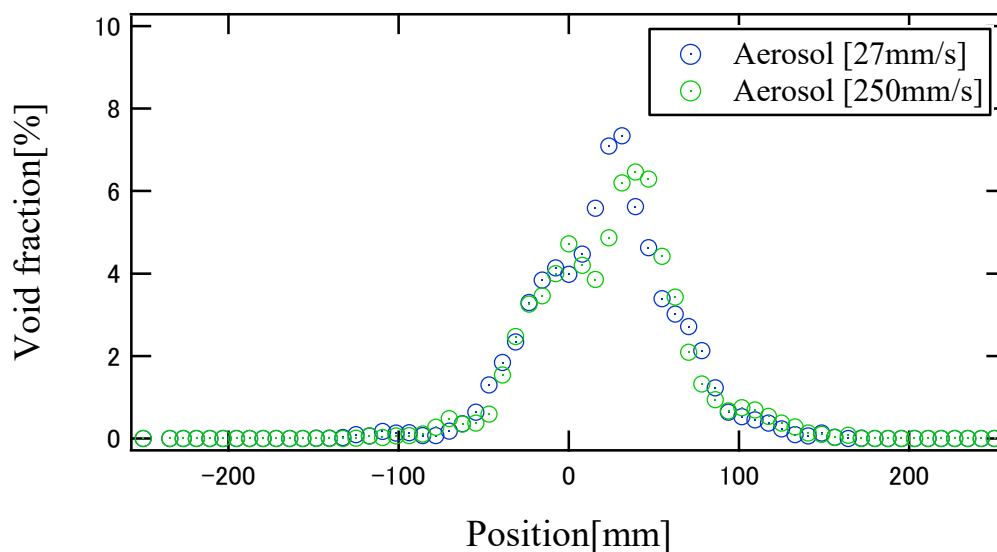


図 3-116 エアロゾルの濃度の違いによる時間平均ボイド率



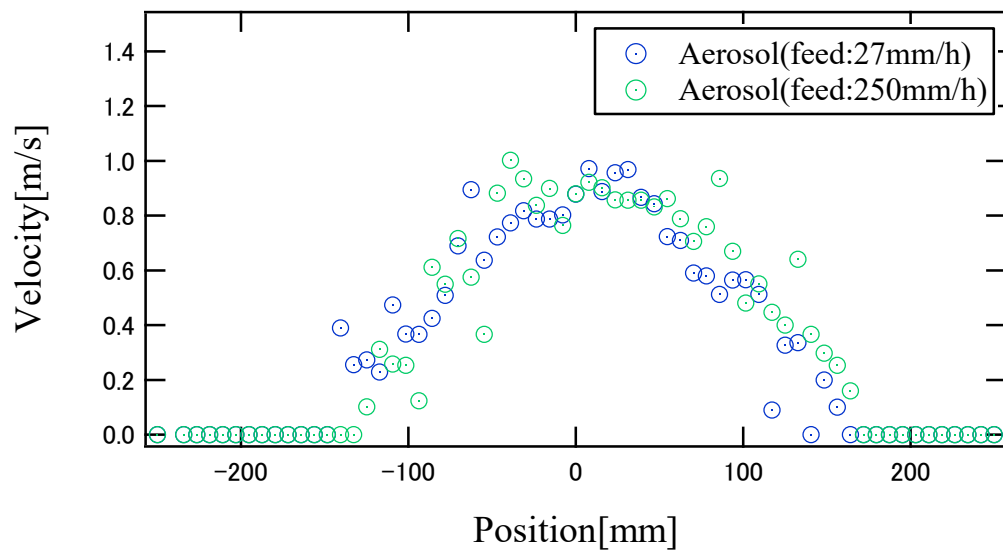


図 3-117 エアロゾルの濃度の違いによる時間平均気相速度



### 3.2.13. エアロゾル粒子による噴流への影響

エアロゾルの粒子径の影響を調べるために、不溶性の粒子径が代表径  $1\mu\text{m}$  単分散のアモルファスシリカを使用した場合に対し、不溶性の代表径が  $0.4\mu\text{m}$  の硫酸バリウムを使用した場合の結果を示す。図 3-118 に流量  $30\text{L}/\text{min}$  の結果を示す。赤いプロットが空気単相、青いプロットがエアロゾルに不溶性の粒子径が代表径  $1\mu\text{m}$  単分散のアモルファスシリカを用いた固気二相流である。緑のプロットがエアロゾルに代表径が  $0.4\mu\text{m}$  の硫酸バリウムを用いた固気二相流である。左のグラフが  $10\text{s}$  の時間平均ボイド率である。縦軸がボイド率、横軸は中心がノズル位置、左右が水槽の壁面である。右のグラフが  $10\text{s}$  の時間平均気相速度である。縦軸が気相速度、横軸は中心がノズル位置、左右が水槽の壁面である。グラフから不溶性の代表径が  $0.4\mu\text{m}$  の硫酸バリウムを使用した場合においても空気単相とボイド率、気相速度分布に大きな違いはないことが確認できた。図 3-119 に流量を二倍にした  $60\text{L}/\text{min}$  の結果、図 3-120 に流量を三倍にした  $90\text{L}/\text{min}$  の結果を示す。これらの結果から不溶性粒子をエアロゾルとして用いた場合、空気単相とエアロゾルを含む固気二相流ではボイド率、気相速度に大きな違いは生じない事が確認できた。

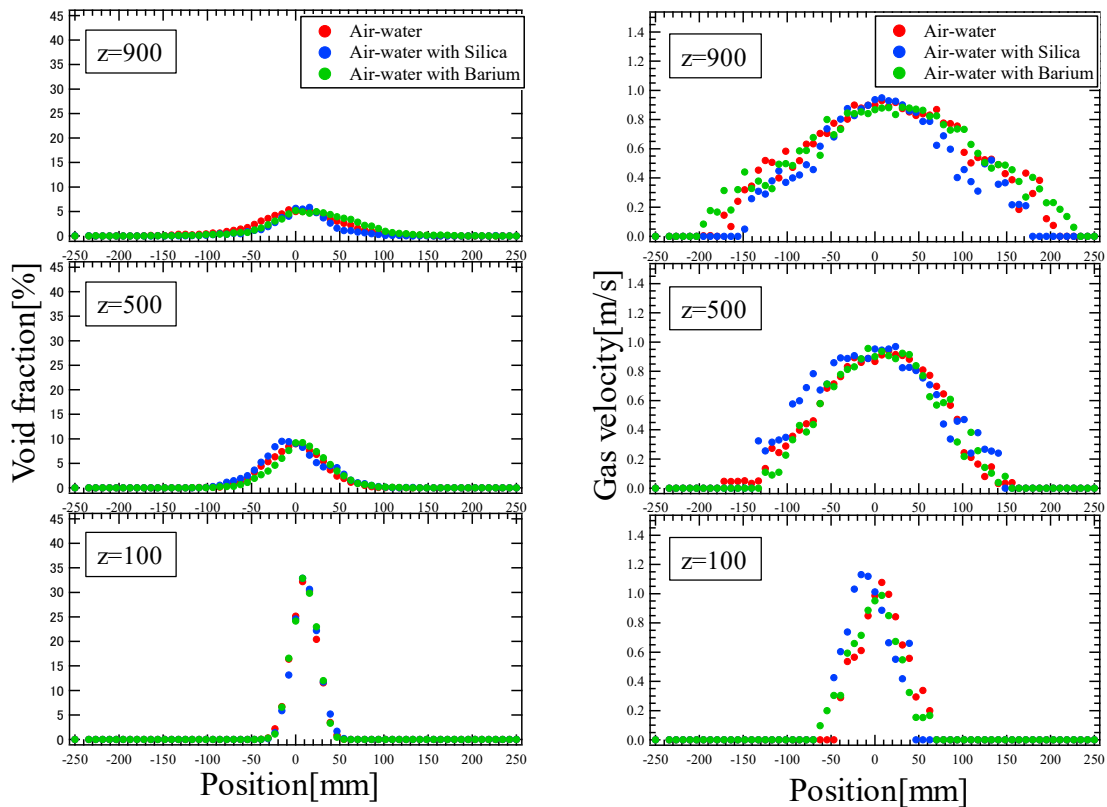


図 3-118 流量  $30\text{L}/\text{min}$  条件での空気単相，エアロゾル粒子にアモルファスシリカ，硫酸バリウムを用いた条件での高さ毎のボイド率，気相速度

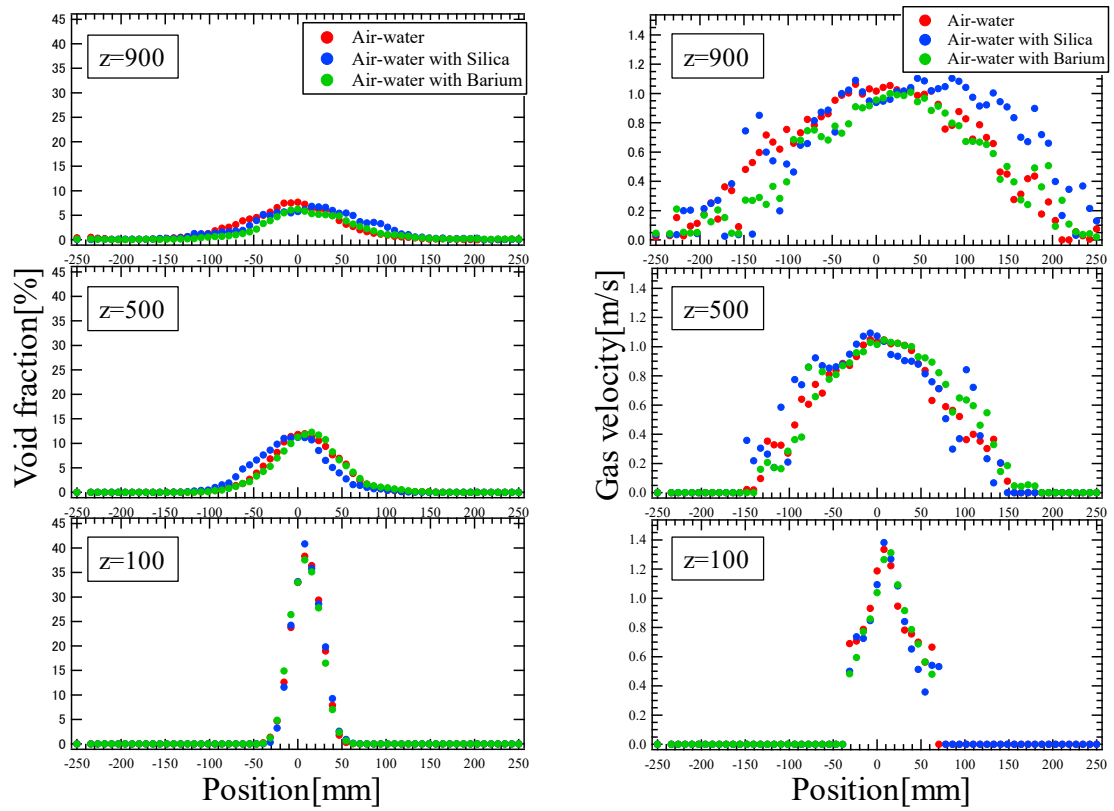


図 3-119 流量 60L/min 条件での空気単相，エアロゾル粒子にアモルファスシリカ，硫酸バリウムを用いた条件での高さ毎のボイド率，気相速度

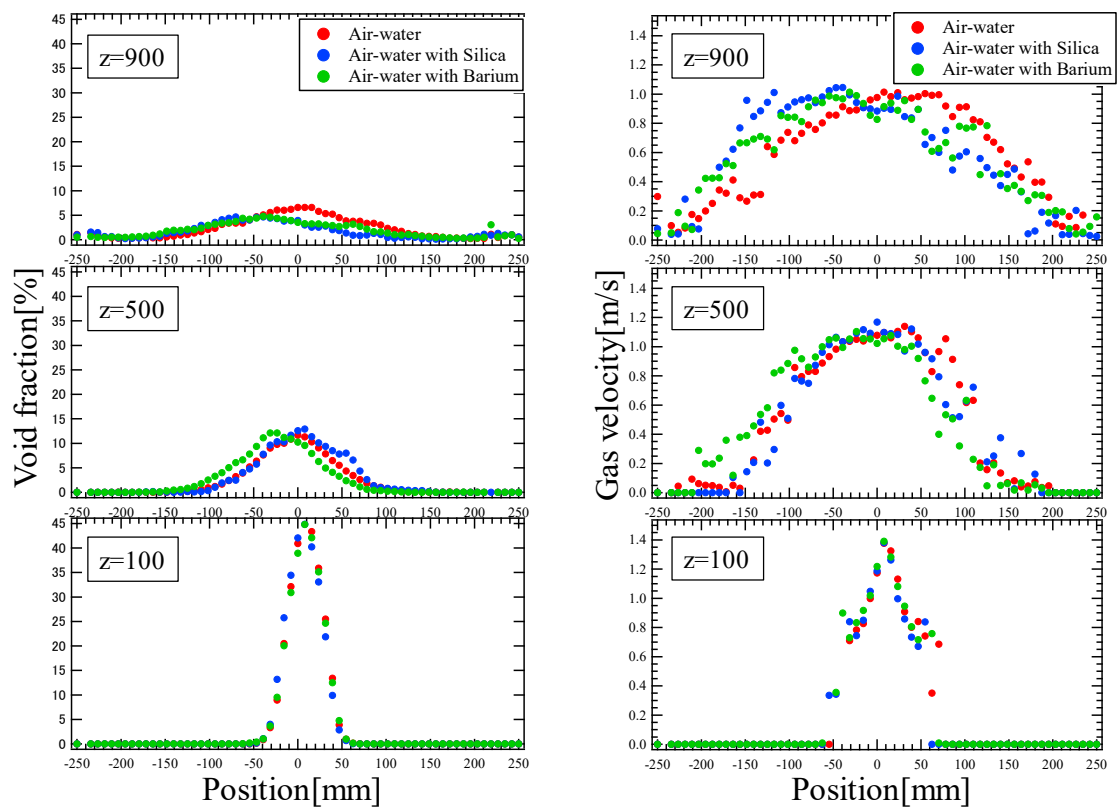


図 3-120 流量 90L/min 条件での空気单相，エアロゾル粒子にアモルファスシリカ，硫酸バリウムを用いた条件での高さ毎のボイド率，気相速

### 3.2.14. 中心ボイド率, 気相速度とノズル距離の関係

図 3-121 に各流量, 粒子におけるノズルからの距離でノズル中央のボイド率の関係を示す. 赤いプロットが空気単相, 青いプロットがエアロゾルに不溶性の粒子径が代表径  $1\mu\text{m}$  単分散のアモルファスシリカを用いた固気二相流である. 緑のプロットがエアロゾルに代表径が  $0.4\mu\text{m}$  の硫酸バリウムを用いた固気二相流である. 縦軸にノズルからの距離, 横軸がノズル中央における 10s の時間平均ボイド率である. ノズルから 300mm 付近を境にボイド率の低下が緩やかになっていることが確認できる. これは, 大気泡のグロービュール領域から小気泡の気泡群のスウォーム上昇領域に遷移する領域がこの付近にあることがわかる. また, 空気単相, エアロゾル粒子に代表径  $1\mu\text{m}$  単分散のアモルファスシリカを用いた場合, 代表径  $0.4\mu\text{m}$  の硫酸バリウムを用いた場合においても同じ傾向が示された. これより, 不溶性の粒子を用いた場合, 流量, 代表径によらず空気単相とグロービュール領域, スウォーム上昇領域の範囲に違いがないことを確認できた.

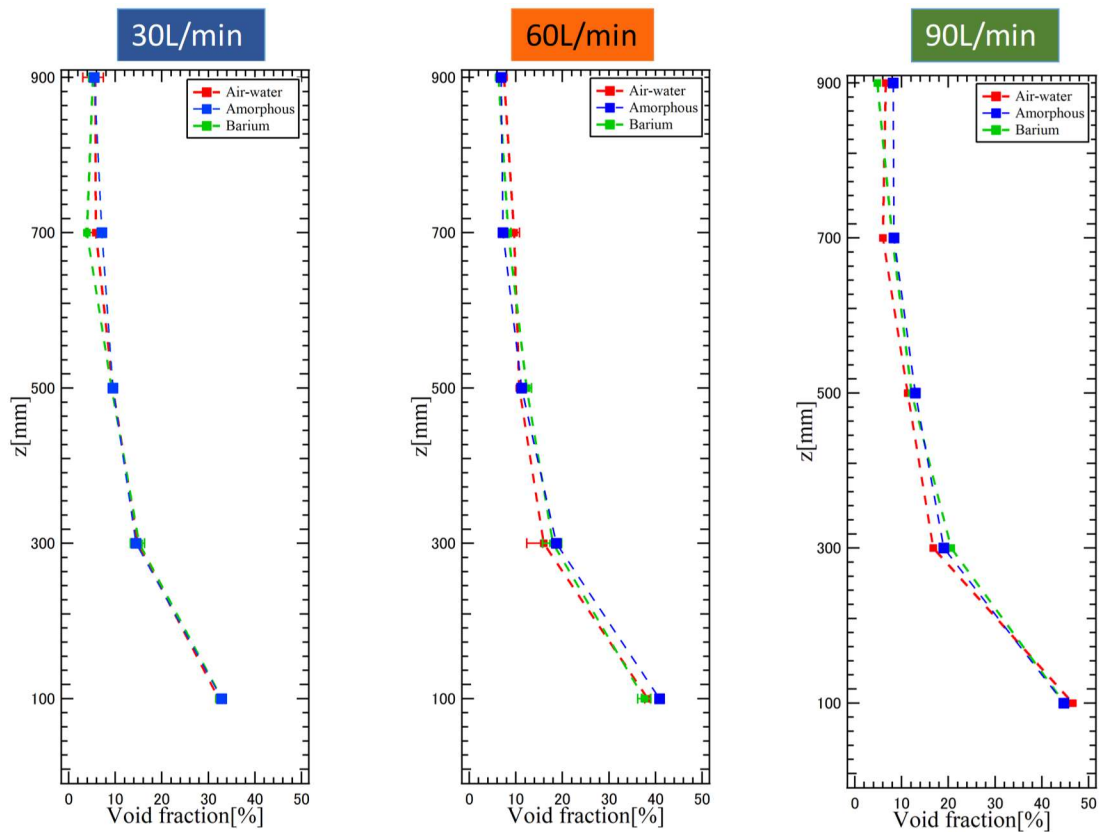


図 3-121 ノズル中央における高さ毎のボイド率変化

### 3.2.15. ノズル中央の気相速度率-ノズル距離の関係

図 3-122 に各流量、粒子におけるノズルからの距離でノズル中央の気相速度の関係を示す。赤いプロットが空気単相、青いプロットがエアロゾルに不溶性の粒子径が代表径  $1\mu\text{m}$  単分散のアモルファスシリカを用いた固気二相流である。緑のプロットがエアロゾルに代表径が  $0.4\mu\text{m}$  の硫酸バリウムを用いた固気二相流である。縦軸にノズルからの距離、横軸がノズル中央における 10s の時間平均ボイド率である。グラフから低流量に比べ高流量ではノズル近くでは流速が早いことが確認できる。その後ノズルから 300mm 付近で低下し一定速度になることが確認できる。この領域には大気泡のグローブール領域から小気泡の気泡郡のスウォーム上昇領域に遷移する領域があることが確認されており領域の変化が気相速度に関係していることが示唆された。

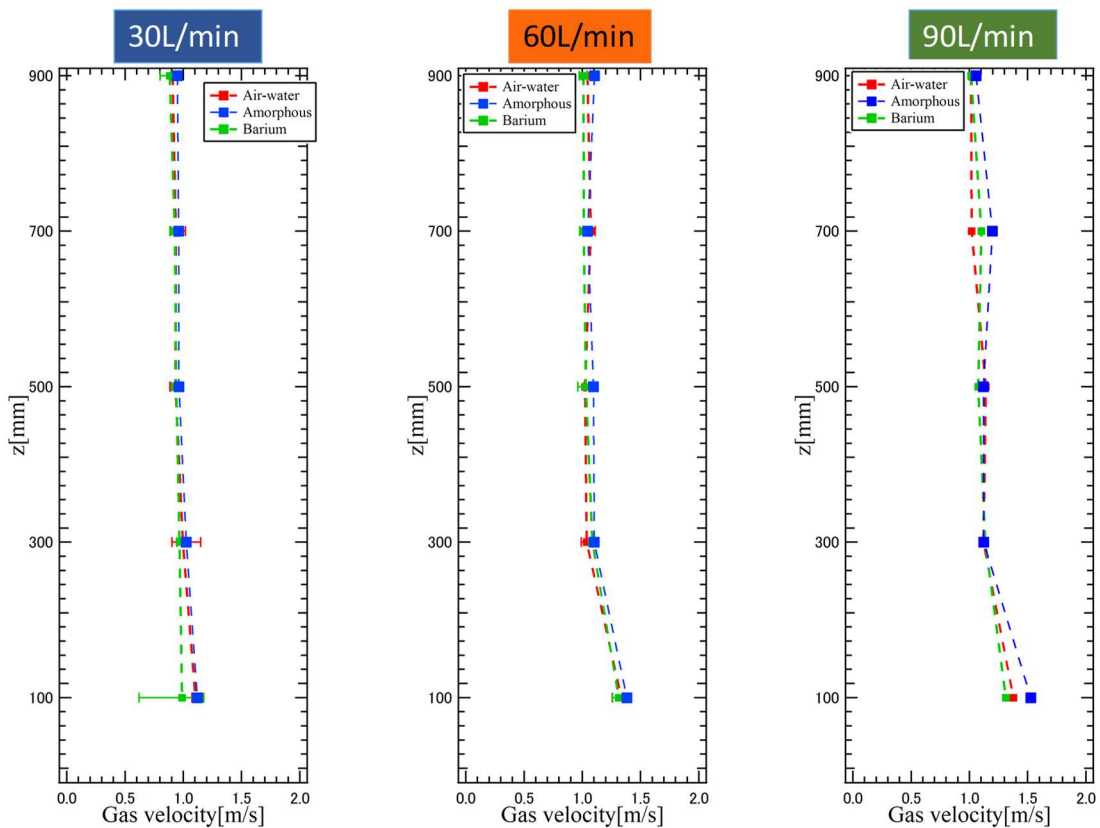


図 3-122 ノズル中央における高さ毎の気相速度変化

### 3.2.16. スウォーム上昇速度評価

実験値と MELCOR にて算出されるスウォーム上昇速度の比較を行った。この際、実験値は噴流の速度であるため WMS にて計測された気相速度が 0m/s 以上のものを平均にかけて噴流のスウォーム上昇速度を算出した。赤いプロットが空気単相、青いプロットがエアロゾルに不溶性の粒子径が代表径 1  $\mu\text{m}$  単分散のアモルファスシリカを用いた固気二相流である。緑のプロットがエアロゾルに代表径が 0.4  $\mu\text{m}$  の硫酸バリウムを用いた固気二相流である。縦軸にスウォーム上昇の距離、横軸がノズルからの距離である。黒線は MELCOR にて以下の式を用いて計算されるスウォーム上昇速度である。(Gauntt et.al.,2000)

$$V_{sw} = \left[ \frac{Q_s + 5.33}{3.011 \times 10^{-3}} \right]^{\frac{1}{2}} (1 - 3.975 \times 10^{-4} \times Z) \quad (41)$$

MELCOR によって算出されたスウォーム上昇速度と実験値を比較したところ、低流速では近い傾向となるものの、すべての条件において MELCOR によって算出されたスウォーム速度は実験結果に比べ遅く MELCOR では過小評価されることが示唆された。

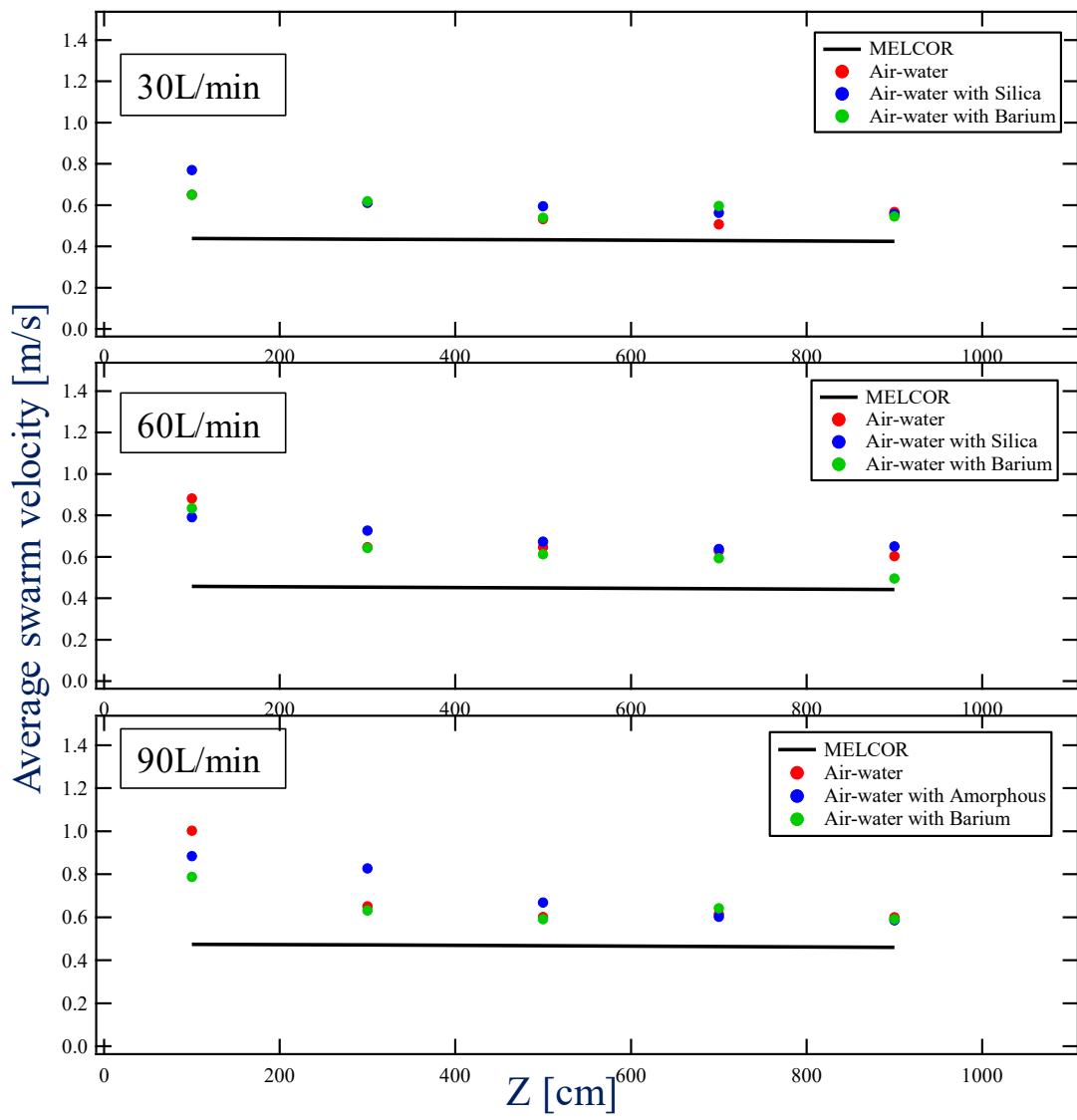


図 3-123 MELCOR によって算出されたスウォーム上昇速度と実験値の比較

### 3.2.17. 画像処理による気泡径分布評価

ノズルの各距離において可視化計測を行った。図 3-124 は各距離における可視化画像である。流量は 60L/min で行った。左が空気単相、右がエアロゾル粒子アモルファスシリカを使用した場合である。ノズル付近では大気泡を生成しているのがわかる。その後ノズルから 500mm 付近ではスウォーム上昇領域になり小気泡が多くを締めていることが確認できる。しかし、MELCOR ではスウォーム上昇領域では気泡系は全て同じ径であると考えられているのに対し可視化画像では気泡径の大きさは均一でないことが確認でき MELCOR と不一致であった。更に上部のノズルから 900mm 付近でも同様の傾向が確認でき、気泡径がすべて同じ径であることは確認できなかった。画像を元に以下の画像処理にかける。楕円の方程式は以下の式で表せる。この時、未知数は 5 つであるため 5 つそれぞれの座標がわかれば方程式から楕円の長軸、短軸を求めることができるため、画像の気泡を 5 箇所プロットし座標を与えることで気泡径、アスペクト比の計測を行う。

$$\left[ \frac{(x - x_0)\cos\theta + (y - y_0)\sin\theta}{a} \right]^2 + \left[ \frac{-(x - x_0)\sin\theta + (y - y_0)\cos\theta}{b} \right]^2 = 1 \quad (42)$$

$$x^2 + Axy + By^2 + Cx + Dy = E = 0 \quad (43)$$

これを定量的に評価するため画像処理を行い気泡径の算出を行った結果を図 3-125 に示す。縦軸が検出された気泡の数、横軸は気泡の径である。赤いプロットが空気単相、青いプロットが空気にエアロゾルを含む固気二相流の結果である。気泡径が均一でないことが確認できた。しかし、この画像処理は撮影範囲が広いためノズルからの距離が広いため詳細な影響が確認できないことと、使用している可視化水槽が幅 500mm あるためカメラからの距離によって気泡系が異なる問題が発生するため、WMS にて断面のみの計測を行う。



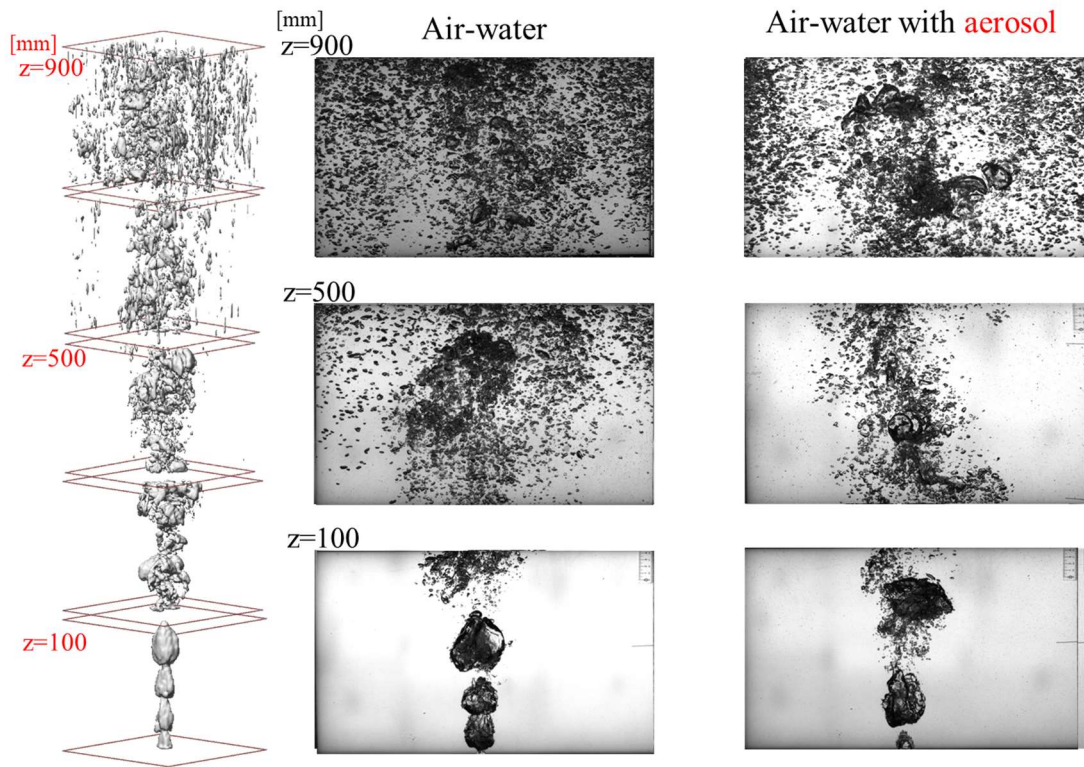


図 3-124 各ノズル距離における噴流可視化画像

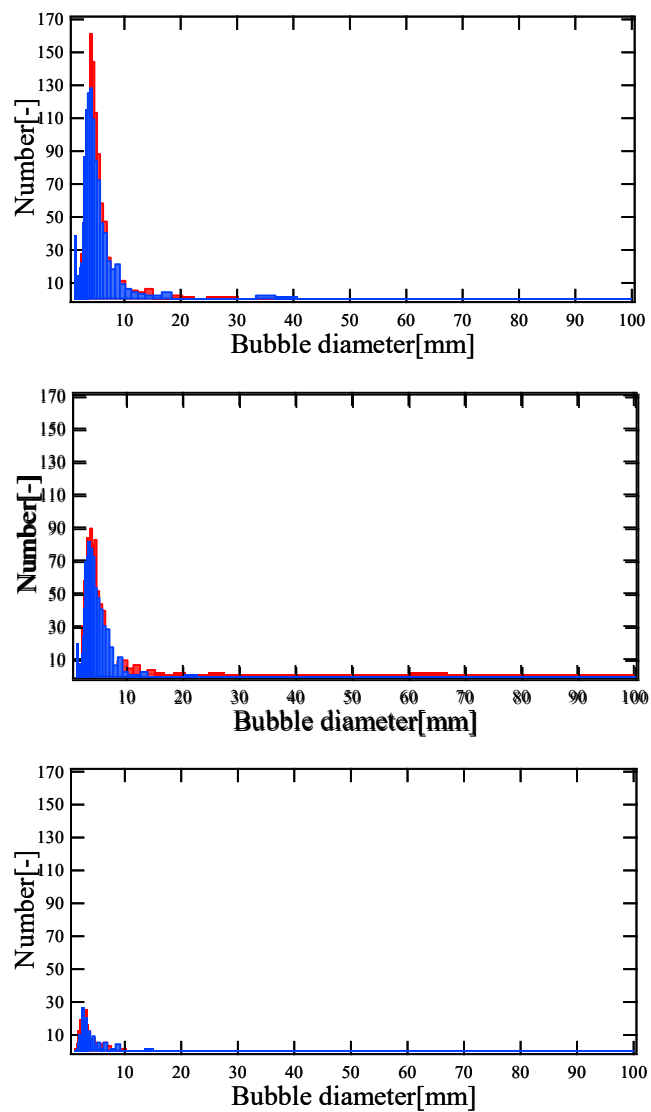


図 3-125 画像処理によって得られたエアロゾルの有無による気泡分布の違い

### 3.2.18. WMS による気泡径分布評価

図 3-126 に WMS から 10s 間の平均を取った気泡径分布を算出した結果を示す。これより、ノズルから近い  $Z=100\text{mm}$  では少気泡、大気泡それぞれにピークが確認できるのに対し。上部の  $Z=500\text{mm}$ ,  $900\text{mm}$  では小気泡でのみピークが確認できる。これは、ノズルから  $100\text{mm}$  では大気泡にグローブ領域であり、 $500\text{mm}$  上部では小気泡の気泡群のスウォーム上昇領域であることがわかる。さらに、ノズルから遠くなるにつれて、赤い空気単相に比べて、青いエアロゾルを含む固気二相流では気泡径分布が小気泡寄りになっていることが確認できる。これは、移行したエアロゾル粒子が界面活性剤の役割をしたため他の気泡と合体しにくくなることが要因であると考えられる。

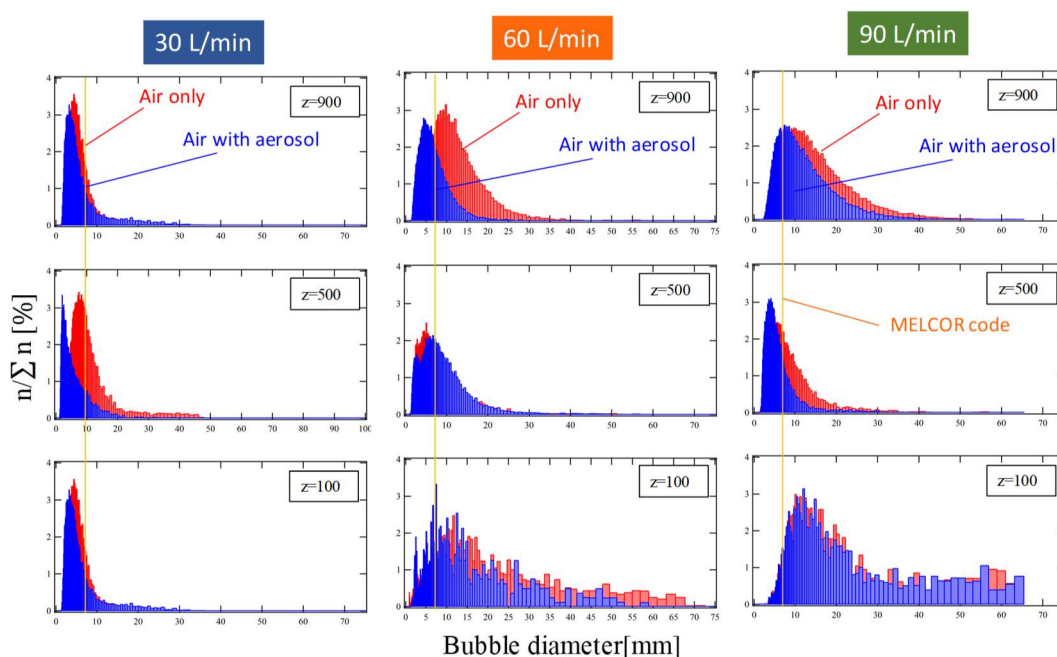


図 3-126 WMS によって得られたエアロゾルの有無による気泡分布の違い

### 3.2.19. 気泡形状計測実験装置

図 3-127 の実験装置を用いてバックライト法にて可視化計測を行い，撮影した画像から画像処理を用いてアスペクト比の計測を行った．図 3-128 が上面図である．この際，流量は 30L/min，ノズル内径を 3mm，水位を 1000mm とした．撮影部はノズルから 200mm，600mm 上部の撮影を行った．

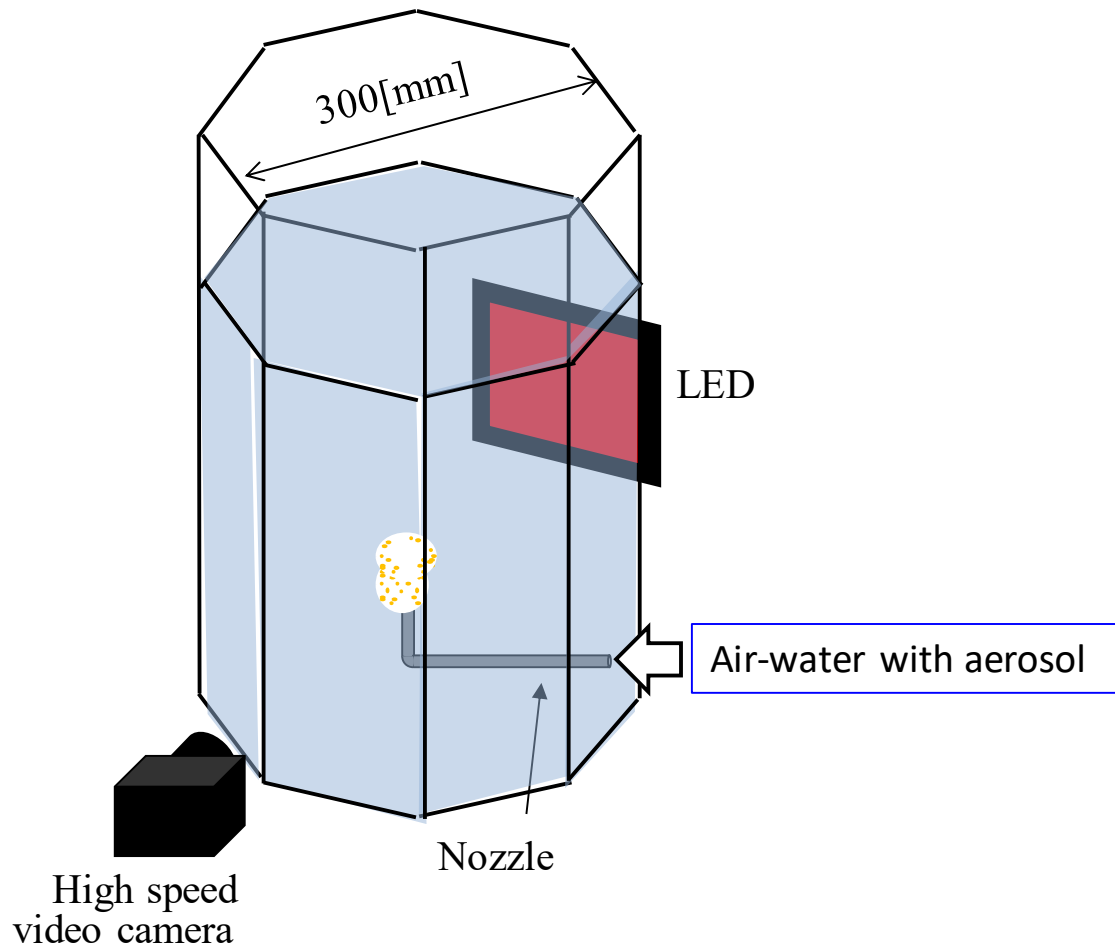


図 3-127 気泡形状観測実験装置

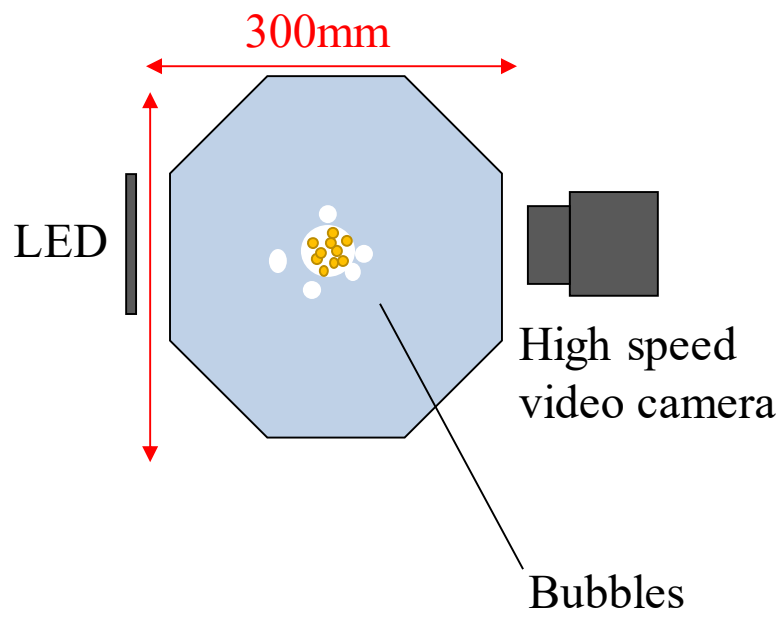


图 3-128 气泡形状观测实验装置(上面图)

### 3.2.20. 気泡形状可視化計測結果

図 3-129 に各高さにおける可視化画像を示す。作動流体にエアロゾルを含む気二相流を用いた場合は液相側へ移行し水が白濁しているのが確認できる。この際の画像を画像処理にかける。その際、ピントが合っていないもの大気泡は処理にかけない。また、アスペクト比は長辺を短辺で除したものを使用する。

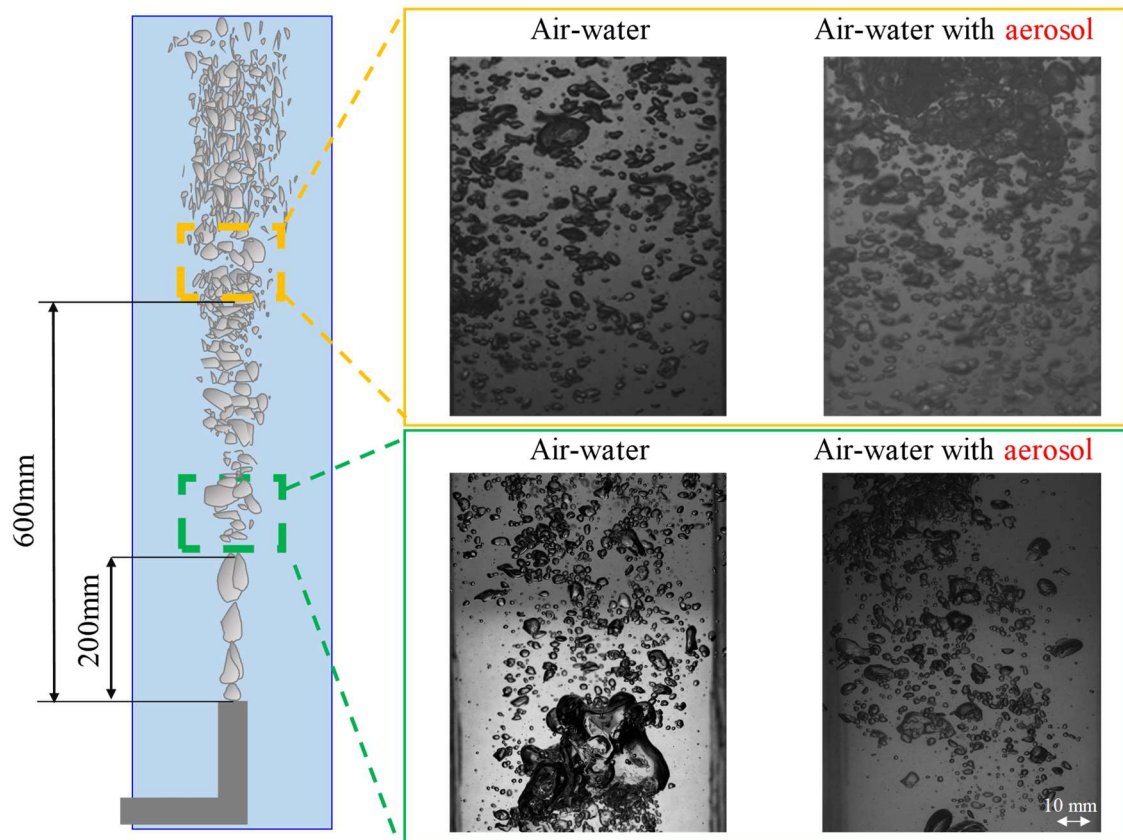


図 3-129 可視化による気泡形状の違い

### 3.2.21. エアロゾル粒子のアスペクト比への影響

図 3-130 に各高さにおける気泡径とアスペクト比の関係を示す。

赤いプロットが空気単相，青いプロットがエアロゾルを含む固気二相流である。黒い実線が以下の式で定義される MELCOR にて定義されている式である。(Gauntt et.al.,2000)

$$\frac{a}{b} = \begin{cases} 1 & (d_B < 0.15 \text{ cm}) \\ 0.817 + 1.13466d_B - 0.3795d_B^2 & (0.15 < d_B < 1.3 \text{ cm}) \\ 1.675 & (d_B > 1.3 \text{ cm}) \end{cases} \quad (44)$$

黒い点線は以下で定義される Wellek の式である。(Wellek et.al.,1966)

$$\frac{a}{b} = 1 + 0.163E_o^{0.757} \quad (45)$$

$E_o$ 数は以下の式で表される。 $g$ は重力加速度， $\rho_L$ は液相密度， $\rho_g$ は気相密度， $\sigma$ は表面張力である。

$$E_o = \frac{g(\rho_L - \rho_g)d_B^2}{\sigma} \quad (46)$$

縦軸にアスペクト比，横軸に気泡径を取ったものである。この結果から空気単相とエアロゾルを含む固気二相流ではアスペクト比に違いが確認できた。図 3-131 はノズルから 200mm 上部におけるアスペクト比と気泡径の関係，さらにアスペクト比の頻度を示す。エアロゾルを含む固気二相流ではアスペクト比が 1.0-1.25 付近の範囲で違いが確認でき，空気単相と比べエアロゾルを含む固気二相流では低いアスペクト比を確認できる。更に上部のノズルから 600mm 上部でのアスペクト比と気泡径の関係，さらにアスペクト比の頻度を図 3-132 に示す。200mm 上部に比べて更に顕著な違いが確認出来た。また，頻度で全体の総数が少ないのはノズルから上部になり小気泡径の気泡郡となりピントが合わない気泡が多くなった為である。600mm 上部ではアスペクト比が 2.0 以降で空気単相とエアロゾルを含む固気二相流では大きな違いが確認でき，エアロゾルを含む固気二相流ではアスペクト比の分布が 1.0 寄りになり扁平が少ないことが確認できる。これは，気相側にあった粒子が液相側へ移行し界面で界面活性剤の役割をしたことによって界面のスリップの関係が原因であると考えられる。

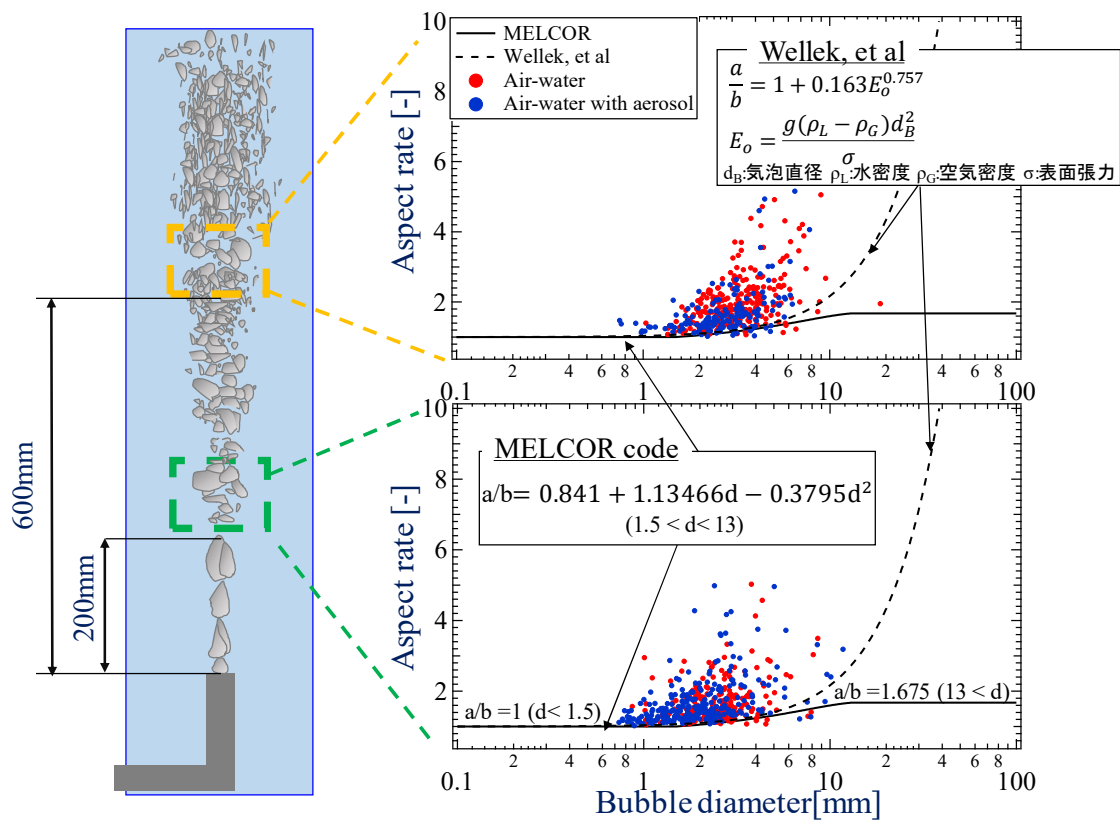


図 3-130 各ノズル距離におけるエアロゾルによる気泡形状の影響

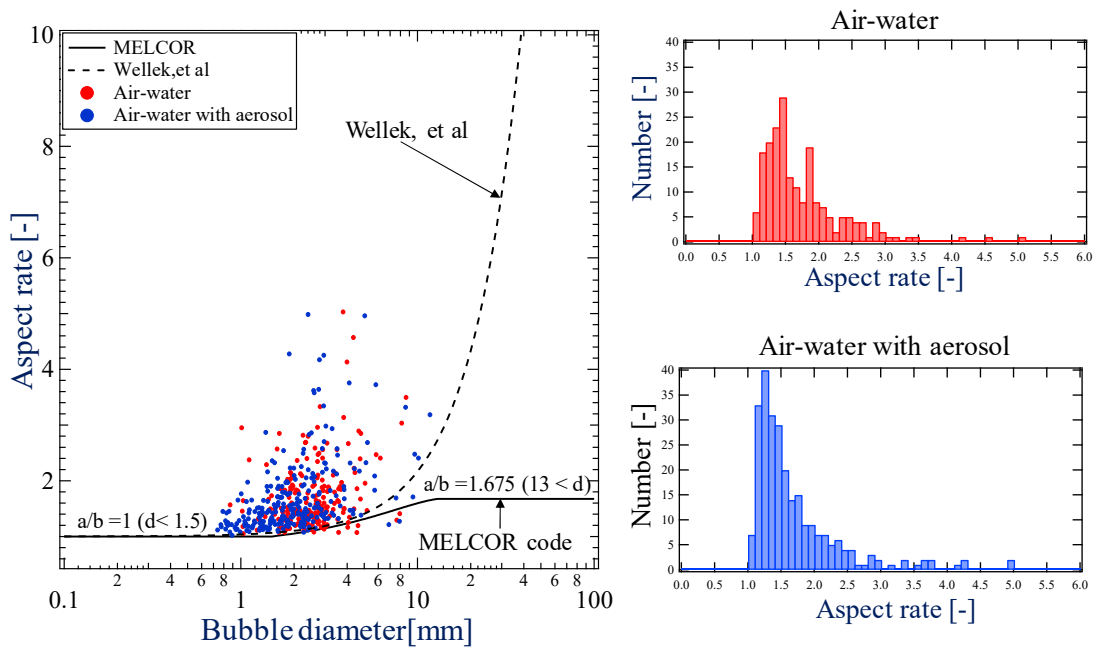


図 3-131 ノズルから 200mm 上部におけるエアロゾルによる気泡形状の影響



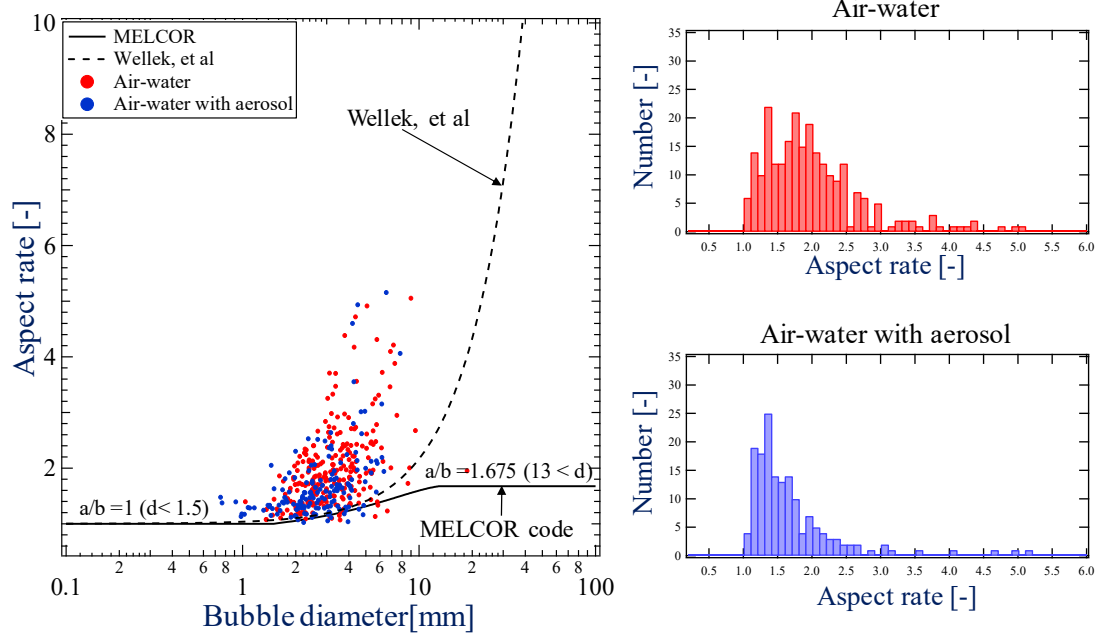


図 3-132 ノズルから 600mm 上部におけるエアロゾルによる気泡形状の影響

### 3.2.22. エアロゾル移行挙動実験装置

図 3-133 の実験装置を用いてエアロゾル粒子が気相側から液相側へ移行する挙動の観測を行った。図 3-134 が上面図である。ノズルからエアロゾル粒子に蛍光粒子を用いてレーザーを照射し蛍光したところをバックライト法にて撮影を行う。その際、流量を 10L/min としノズル内径を 6mm、水位を 1000mm の条件で行った。エアロゾル粒子に蛍光粒子の不溶性代表径  $15\mu\text{m}$  の Fluostar, または可溶性代表径  $3.22\mu\text{m}$  のローダミンと可溶性の代表径  $0.04\mu\text{m}$  の OX-50 を混ぜたものを使用した。混ぜる理由としては、蛍光粒子の Fluostar, ローダミンの粒径が大きいため、OX-50 と混ぜることで分散性を向上させた。

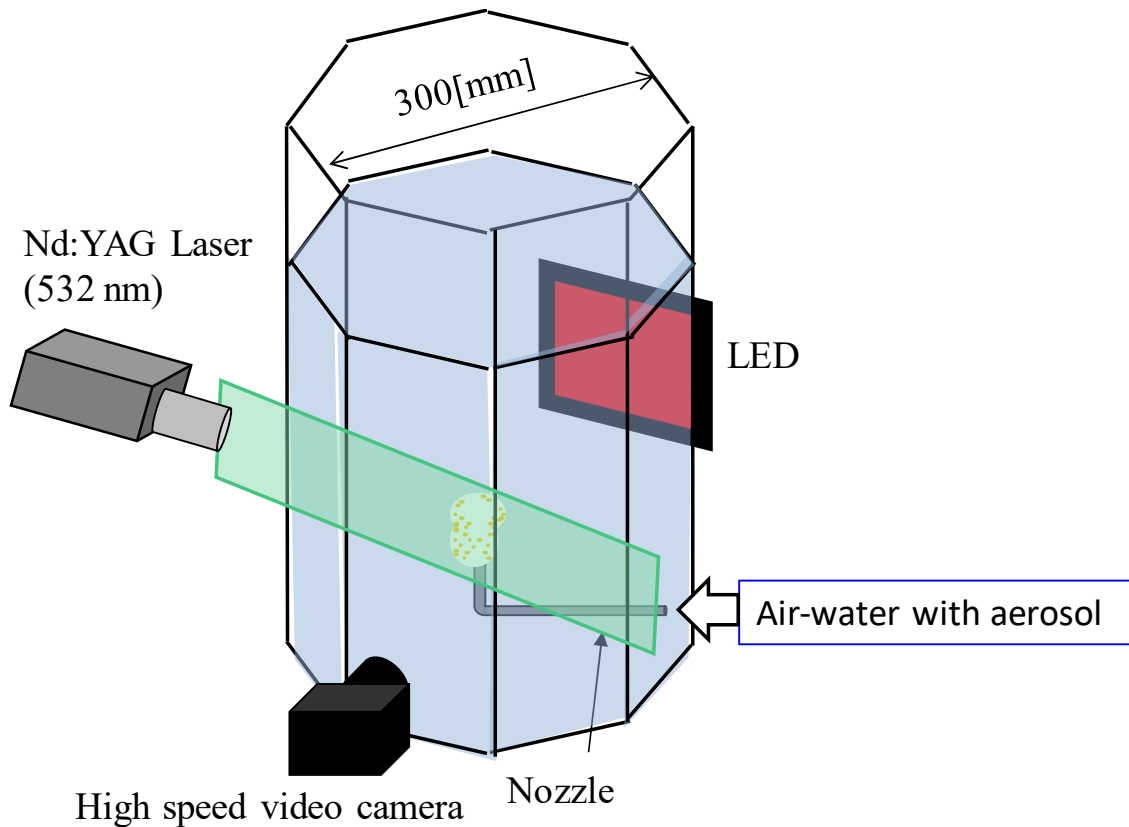


図 3-133 エアロゾル粒子移行挙動可視化実験装置

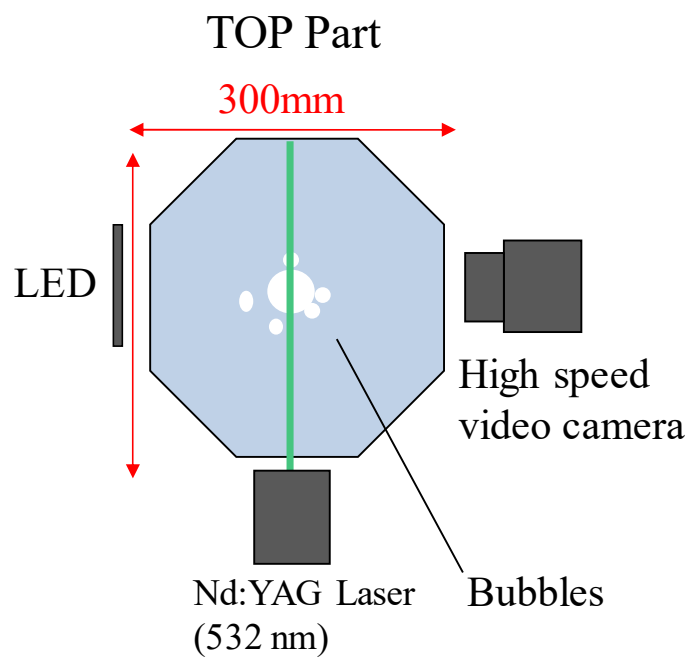


図 3-134 エアロゾル粒子移行挙動可視化実験装置(上面図)

### 3.2.23. 不溶性粒子の移行挙動可視化計測結果

図 3-135 に Fluostar を使用した条件において気泡が断続的に放出されている時の可視化画像を示す。赤枠で囲っている領域を詳細に見たものが図 3-136 である。気泡がノズルから放出される空気によって界面が陽動し、更に気泡がノズルを離れることによって生じる界面変形によって粒子が気相から液相側へ移行している様子が確認できる。図 3-137 に PIV 処理をかけたものを示す。界面の変形によって粒子が液相側へ移行している事が確認できる。

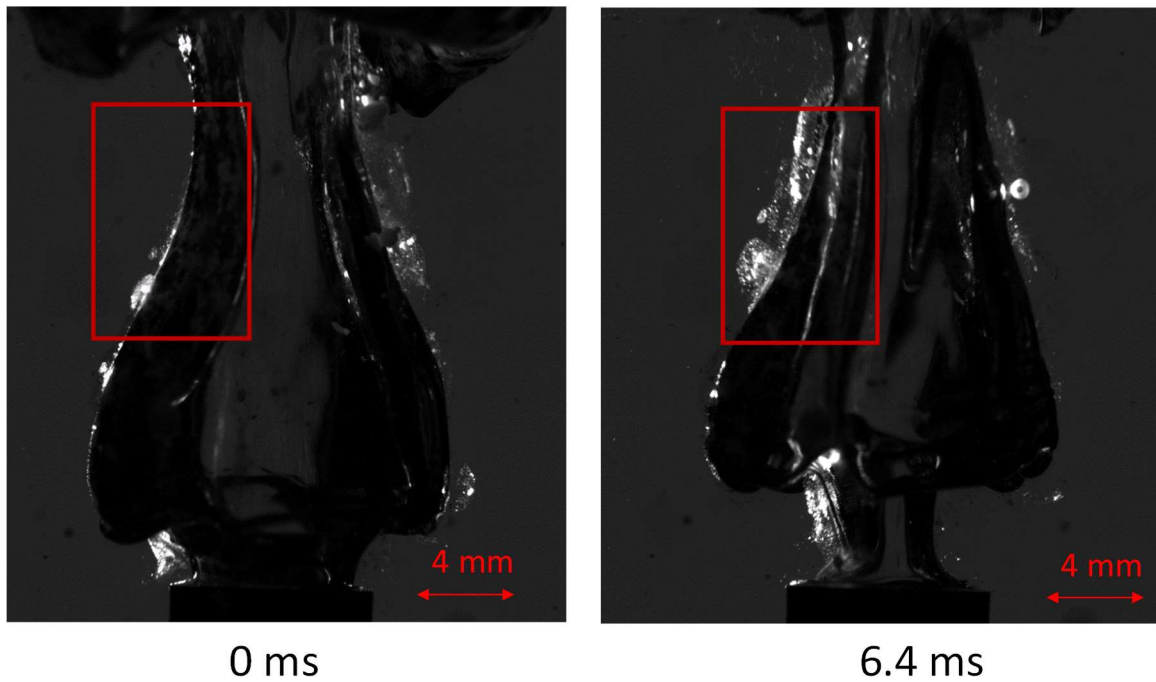


図 3-135 気泡側面におけるエアロゾル粒子の移行挙動

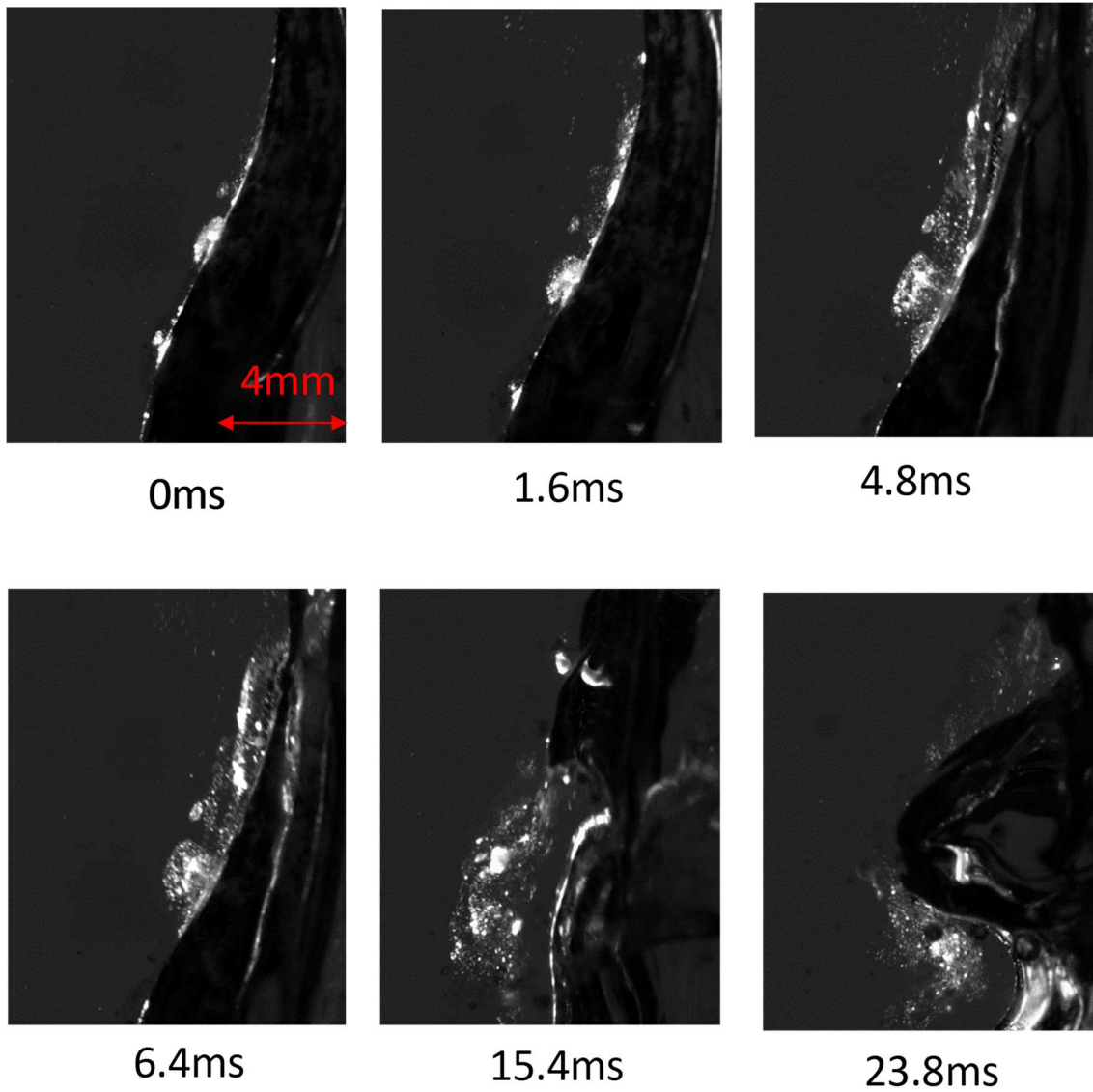


図 3-136 時間毎の気泡の側面における移行挙動

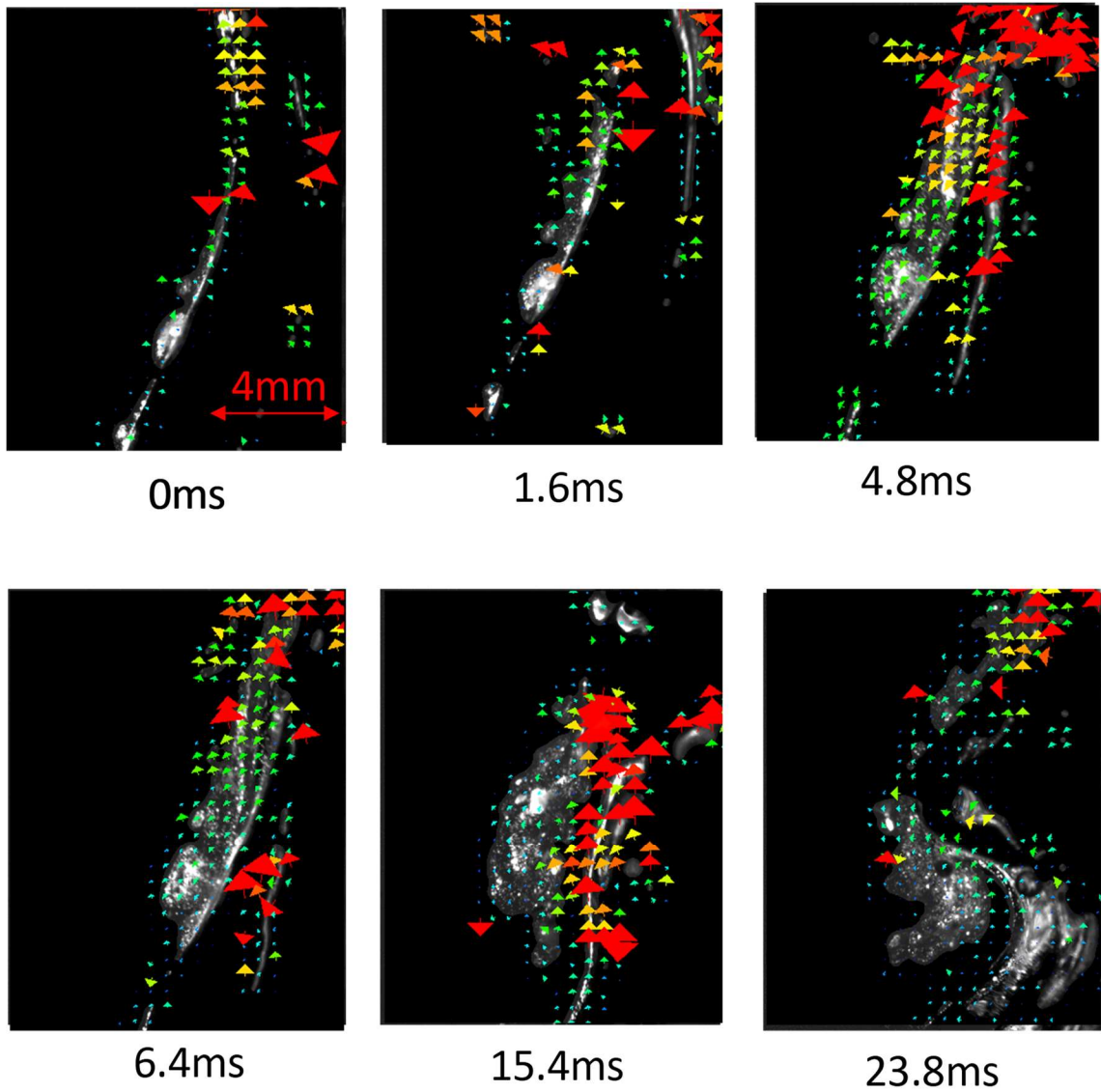


図 3-137 気泡の側面における移行の PIV 画像

### 3.2.24. 可溶性粒子の移行挙動可視化計測結果

図 3-138 に空気単相, エアロゾル粒子に可溶性代表径  $3.22\mu\text{m}$  のローダミンを使用した条件における第一発生気泡の可視化画像を示す. 可視化画像から界面で慣性によって衝突する粒子, 横側で界面変形によって移行する粒子, また移行した後重力沈降し, ノズルから気泡が離れる際に界面に変形によって捕集される様子が確認できる.

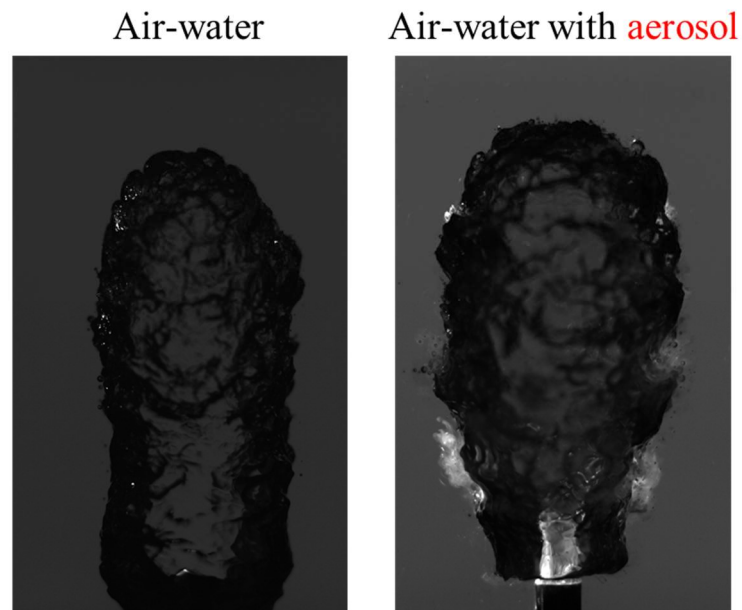


図 3-138 エアロゾル粒子の有無による噴流構造の違い

### 3.2.25. 界面におけるエントレイメント現象

図 3-139 に流量 10L/min の条件におけるエアロゾル粒子に可溶性代表径  $3.22 \mu\text{m}$  のローダミンを使用した条件における第一発生气泡のエントレイメント現象の可視化画像を示す。図 3-140 に流量 30L/min の条件におけるエアロゾル粒子に可溶性代表径  $3.22 \mu\text{m}$  のローダミンを使用した条件における第一発生气泡のエントレイメント現象の可視化画像を示す。これは、界面に慣性によって粒子が衝突する事によって発生していると考えられる。

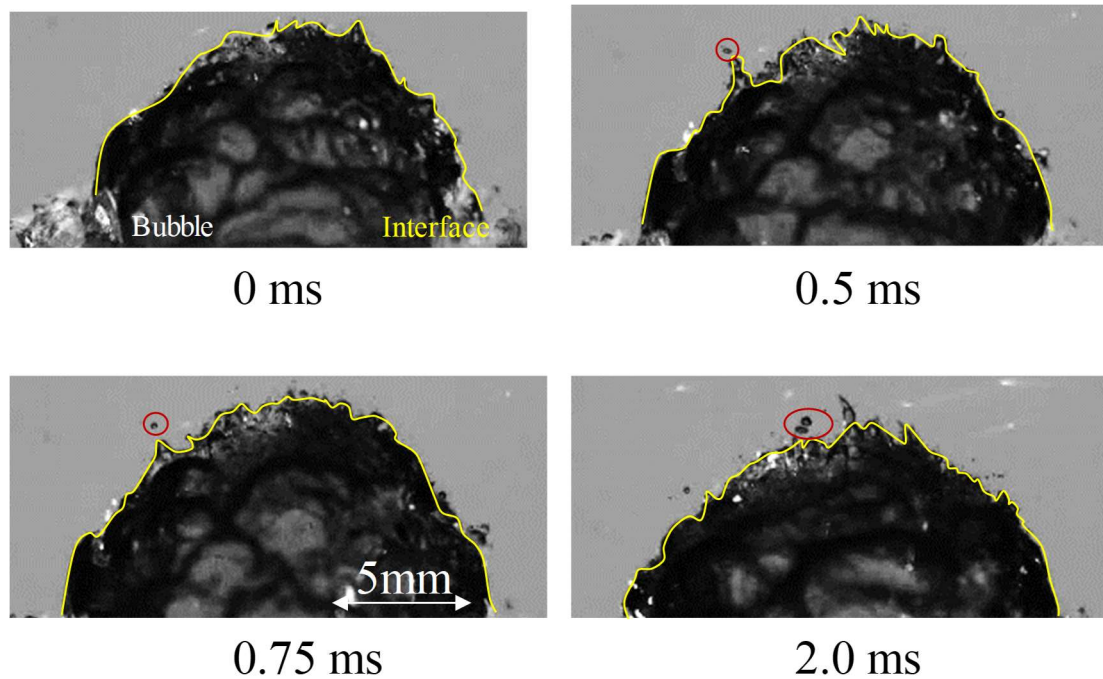


図 3-139 エアロゾルを含む固気二相流で見られるエントレイメント現象(10L/min)



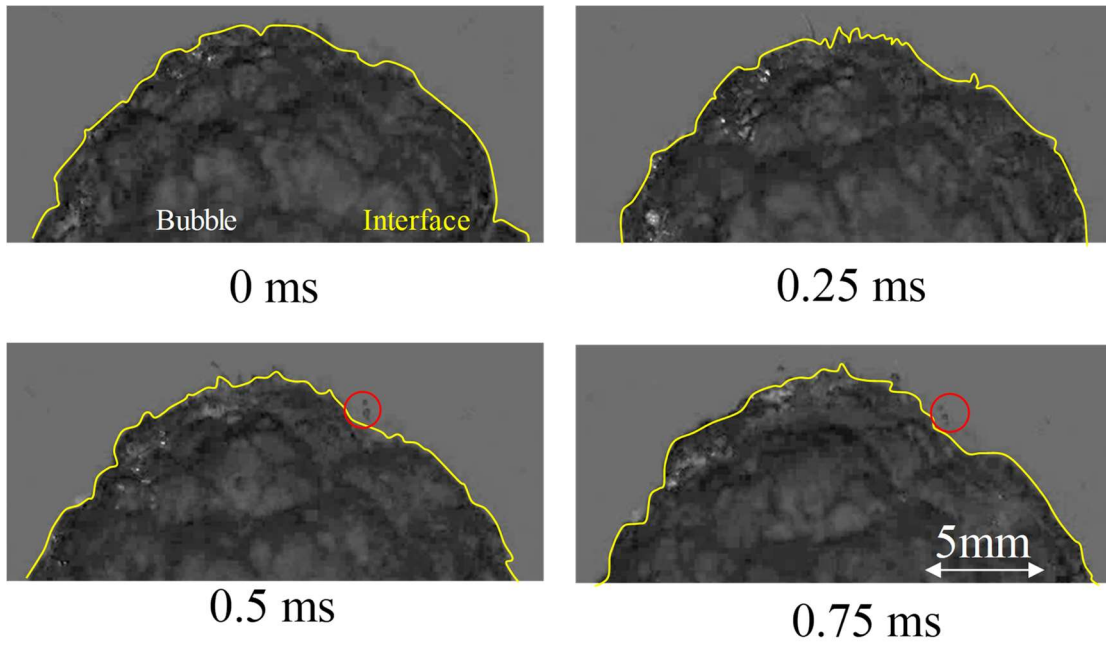


図 3-140 エアロゾルを含む固気二相流で見られるエントレイメント現象(30L/min)

### 3.2.26. エアロゾル粒子の移行挙動

図 3-141 にエアロゾル粒子に可溶性代表径  $3.22\ \mu\text{m}$  のローダミンを使用した条件における第一発生気泡の界面における可視化画像を示す。可視化画像から界面で慣性によって衝突する粒子が確認できる。MELCOR では凝縮、ブラウン運動などと共に界面を超えて液相側へ移行すると考えられている。この現象は MLCOR を再現することができ、妥当性を一部確認できた。今後は界面に衝突した粒子の速度の算出を行いう、ノズルでの見かけ流速と比較を行う予定である

図 3-142 に界面変形によって噴流の側部において複数の粒子が同時に移行する様子が確認できた。これは、MELCOR では考えられていない現象であり、既存解析モデルでは考えられていない現象である。また、今回の可視化では界面を超える粒子に比べ、噴流の側部で界面変形によって移行する粒子のほうが複数確認できた。よって、MELCOR で考えられていないこの現象は DF に大きく効くと言える。

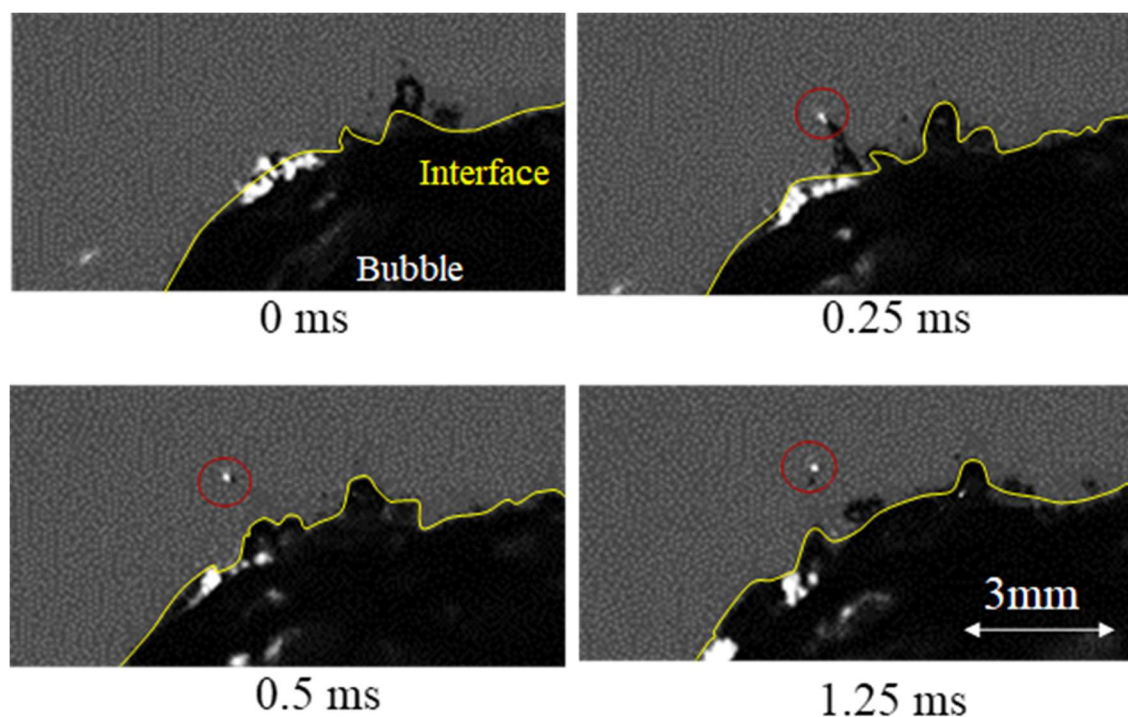


図 3-141 エアロゾル粒子が界面を超えて液相側へ移行する様子

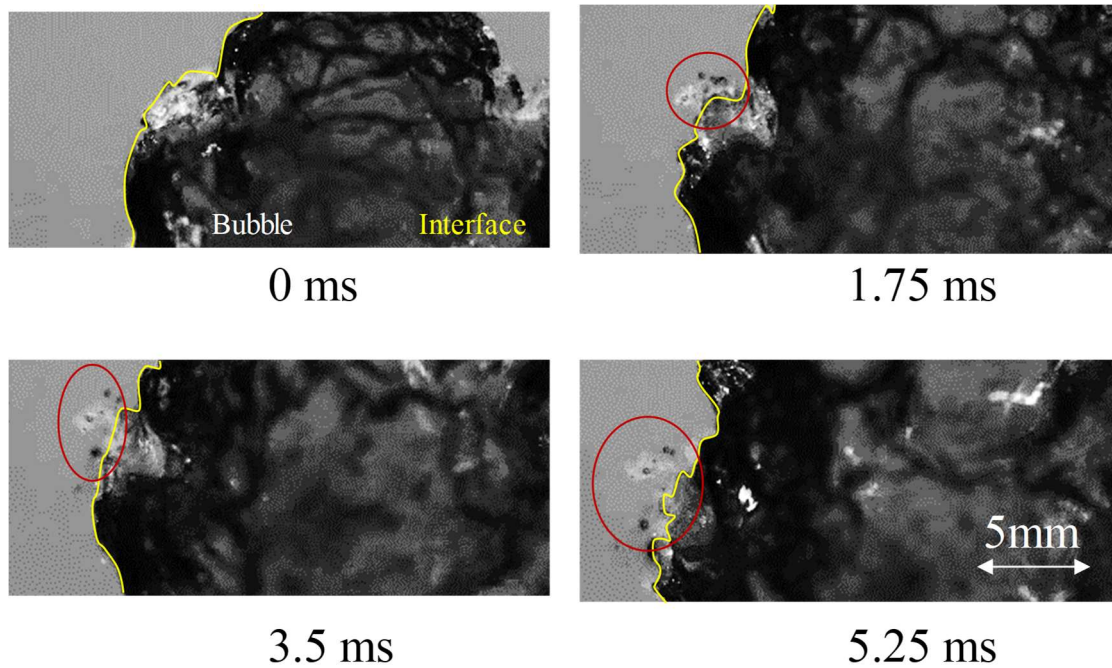


図 3-142 エアロゾル粒子が噴流側部で界面変形によって液相側へ移行する様子

### 3.2.27. エアロゾルを含む固気二相流の結果まとめ

本研究は、プールスクラビングに関する既存の解析コードにおけるモデルの妥当性確認のため、メカニズム解明において重要となるエアロゾルを含む気液二相流挙動を把握することを目的として、気相噴流の可視化および WMS による噴流挙動計測を実施した。以下のような知見を得た。

エアロゾルを含む気液混相流において流動構造の取得を目指し以下の実験を行い結果が得られた。

- ・エアロゾル粒子にアモルファスシリカ、硫化バリウムを使用した条件においては断面ボイド率、断面気相速度はノズルから上昇していくにつれて周囲に伝わっていく様子が確認でき、粒子の径によらず同様の傾向が得られた。また、不溶性粒子の粒径の違いによって空気単相、エアロゾルを含む固気二相流でボイド率、気相速度には影響はなく不溶性粒子の有無で流動構造に大きな違いが生じないことを確認した。
- ・不溶性粒子を使用した条件において、エアロゾル粒子の濃度により噴流のボイド率、気相速度に大きな影響は生じないということを確認した。
- ・MELCOR によって算出されたスウォーム上昇速度と実験値を比較したところ、低流速では近い傾向となるものの、すべての条件において MELCOR によって算出されたスウォーム速度は実験結果に比べ遅く MELCOR では過小評価されることが示唆された。
- ・空気単相に比べエアロゾルを含む固気二相流では気泡径分布が小気泡よりになることが確認できた。これは、エアロゾル粒子によって気泡同士の合体が発生しにくくなったためだと考える。
- ・エアロゾル粒子に硫化バリウムを使用した条件において、エアロゾルを含む場合では空気単相に比べアスペクト比が 1.0 に近づき真円に近づく事が確認できた。これは、エアロゾル粒子が界面活性剤の役割をしたためスリップ比が影響していると考えられる。

除染メカニズム把握のため気相噴流中のエアロゾル挙動の取得を目指し実験を行い以下の結果が得られた。

- ・可視化実験において、連続的に放出される気泡において粒子が界面の変形によって不溶性のエアロゾル粒子が気相側から液相側へ移行している様子を確認し、PIV 処理を用いることによってベクトルの算出を行うことができた。
- ・可視化実験において、ノズルから発生する第一気泡では可溶性エアロゾル粒子を含む固気二相流では界面でエントレイメント現象が確認できた。これは、ノズルから放出されたエアロゾル粒子が噴流の気液界面に衝突したためであると考えられる。
- ・可視化実験において、ノズルから発生する第一気泡では、界面を超えて気相側から液相側へ粒子が移行する様子が確認できた。これは、MELCOR で考えられている現象であり妥当性を確認することができた。加えて、MELCOR では考えられていない界面お揺動によって粒子が気相側から液相側へ移行する様子を確認することができた。揺動によって移行する様子は連続的に気泡が放出されている最中でも発生する現象であり、第一発生気泡問わず発生する現象であると言える。

### 3.3. 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 3-18 で明示した。H29 年度はエアロゾルが含まれる流体の物性とプール水温の影響について検討を実施した。

#### 3.3.1. 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。

$$DF_{OV,part} = \frac{\sum_{i=1}^{NBINS} \dot{m}_{part,i}}{\sum_{i=1}^{NBINS} \left( \frac{\dot{m}_{part,i}}{DF_{OV,i}} \right)} \quad (47)$$

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 3.3.2 および 3.3.3 にて後述する。

$$DF_{OV,i} = DF_{EC} \times DF_{II,i} \times DF_{ER,i} \times DF_{SR,i} \quad (48)$$

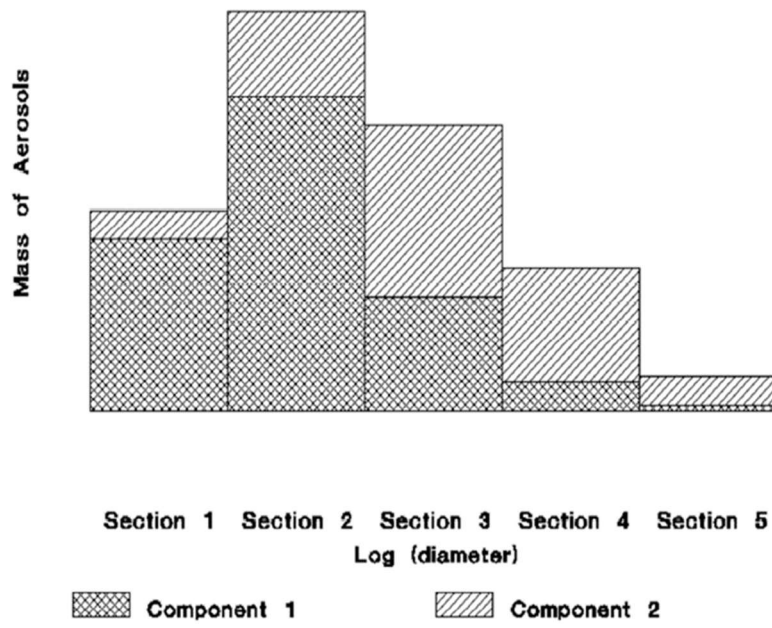


図 3-143 エアロゾルの質量分布 [MELCOR Computer code manuals(1.8.5)]

### 3.3.2. 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。

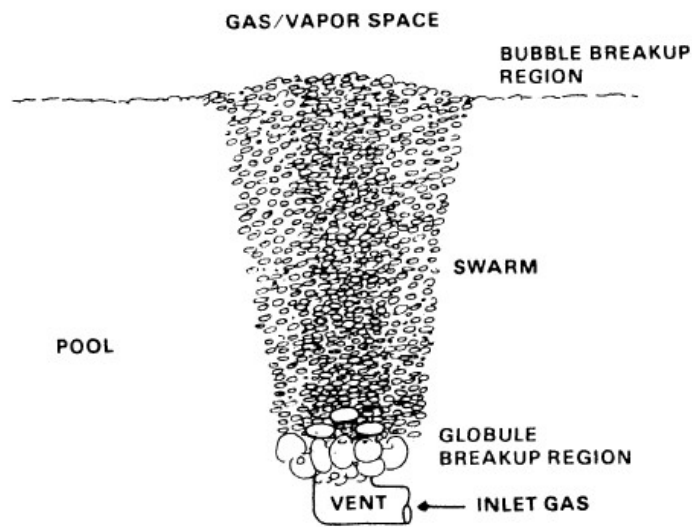


図 3-144 SPARC-90 における流動モデル

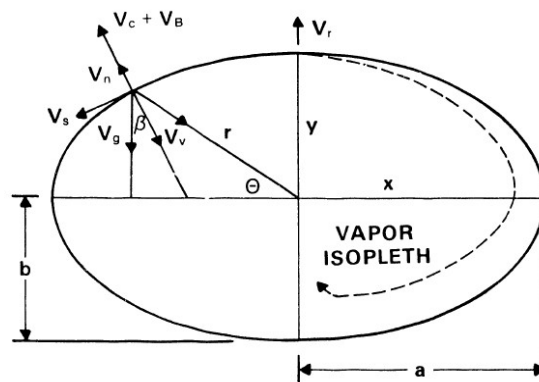


図 3-145 SPARC-90 における気泡モデル

### 3.3.3. 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。

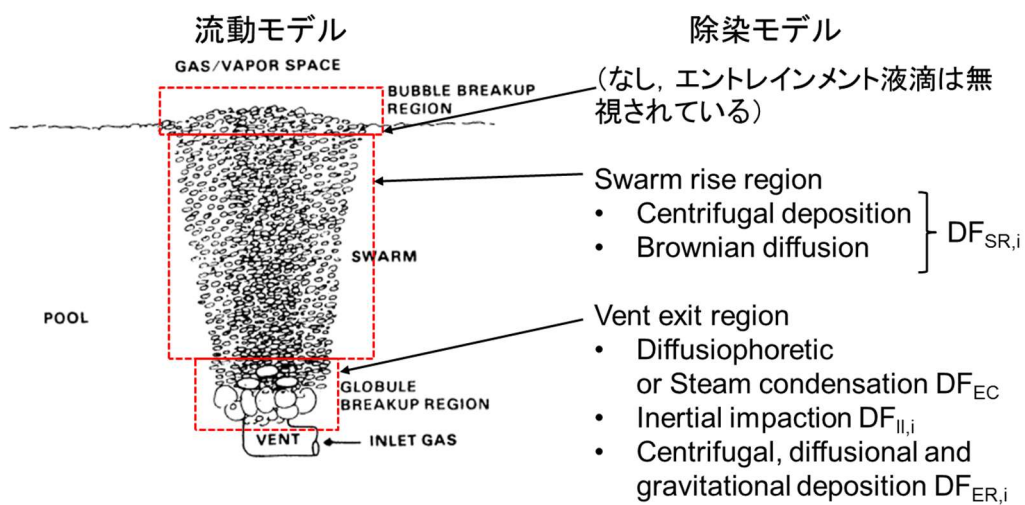


図 3-146 SPARC-90 における除染モデル



### 3.3.4. 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表 3-15 に示す。エアロゾルに関する入力値は表 3-16 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 区間に分けた。

表 3-17 に解析条件ごとのタンク部に貯められた試験流体の入力値を示す。Case1 は空気-水系として平成 28 年度までに実施していた計算条件である。Case1 に対して、蒸気による除染効果への影響を調べるため、Case2 では蒸気と窒素  $N_2$  を相対湿度 50% とした混合気体とした。Case3 では蒸気単相とした。また、Case4, 5, 6 は、蒸気の凝縮量を変えたことによる除染効果への影響を調べるため、Case1, 2, 3 のプール水温を変えた条件とした。プール部の詳細な条件や流動条件は表 3-18 に示す。

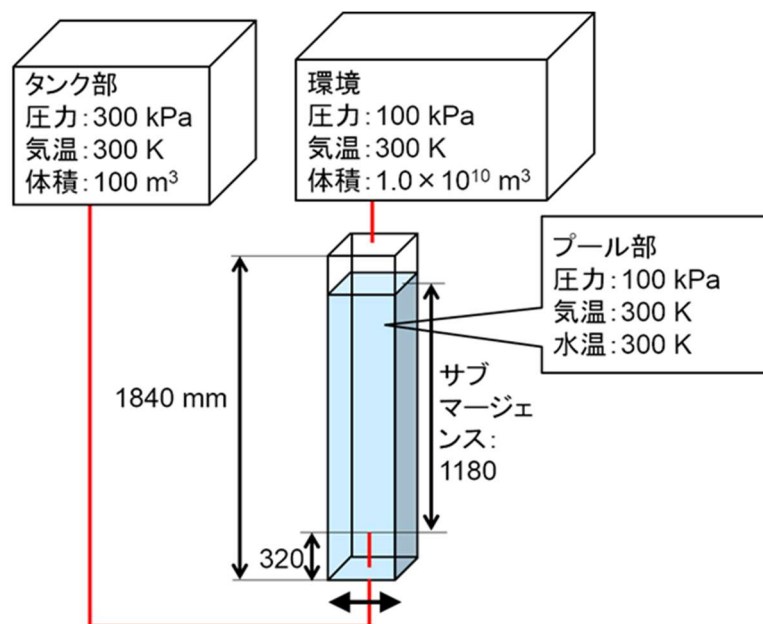


図 3-147 解析体系

表 3-15 解析体系の主要なパラメータの入力値

各ボリューム主要パラメータ				
	体積 [m <sup>3</sup> ]	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 <sup>10</sup>	100	300	-

表 3-16 エアロゾルの入力値

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

表 3-17 試験流体の入力値

	流体	圧力	温度	相対湿度	プール水温
Case 1	空気	300 kPa	300 K	0 %	300 K
Case 2	N <sub>2</sub> , 蒸気	100 kPa	373.15 K	50 %	300 K
Case 3	蒸気	100 kPa	373.15 K	100 %	300 K
Case 4	空気	300 kPa	300 K	0 %	363.15 K
Case 5	N <sub>2</sub> , 蒸気	100 kPa	373.15 K	50 %	363.15 K
Case 6	蒸気	100 kPa	373.15 K	100 %	363.15 K

表 3-18 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	サブマージェンス	計算時間	環境の体積	プール上部の体積	CV節点数	粒子径	プール温度	断面積
			[mm]	[m/s]	[L/min]	[mm]	[s]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]		[μm]	[K]	[m <sup>2</sup> ]
No. 1	試験流体の影響	空気-水	3	1	0.424	900	86400	10 <sup>10</sup>	0.0558	1	1.0-2.0	300	0.09
No. 2	試験流体の影響	蒸気-窒素-水	3	1	0.424	900	86400	10 <sup>10</sup>	0.0558	1	1.0-2.0	300	0.09
No. 3	試験流体の影響	蒸気-水	3	1	0.424	900	86400	10 <sup>10</sup>	0.0558	1	1.0-2.0	300	0.09
No. 4	プール水温の影響	空気-水	3	1	0.424	900	86400	10 <sup>10</sup>	0.0558	1	1.0-2.0	363	0.09
No. 5	プール水温の影響	蒸気-窒素-水	3	1	0.424	900	86400	10 <sup>10</sup>	0.0558	1	1.0-2.0	363	0.09
No. 6	プール水温の影響	蒸気-水	3	1	0.424	900	86400	10 <sup>10</sup>	0.0558	1	1.0-2.0	363	0.09

### 3.3.5. エアロゾルの凝縮および沈降によるエアロゾルの除去

図 3-148 に表 3-17 の Case1 における質量流量から求めた DF とプール部ガス中に残存するエアロゾル質量を示す。図中の DF は、プール部水中への流入したエアロゾル質量を、プール部水中からもしくはプール部からの流出したエアロゾル質量で除すことで算出した。

$$DF = \frac{\text{プール部水中への流入量}}{\text{プール部水中からの流出量}} = \frac{G_1}{G_2} = \frac{\frac{d}{dt}(M_1 + M_2 + M_3)}{\frac{d}{dt}(M_2 + M_3)} \quad (49)$$

$$DF' = \frac{\text{プール部水中への流入量}}{\text{プール部からの流出量}} = \frac{G_1}{G_3} = \frac{\frac{d}{dt}(M_1 + M_2 + M_3)}{\frac{d}{dt}(M_3)} \quad (50)$$

図 3-148 より、DF は 1500 秒まで増加し続け、その後 DF が 8 程度で一定値となった。また、DF' は 1500 秒まで減少し続け、その後 DF' は 8 程度で一定値となった。DF と DF' は本来同じ値となるはずだが、解析開始 1500 秒までは異なる値となることがわかった。このときに、プール部ガス中に残存するエアロゾル質量を見ると、1500 秒まで質量は増加し続け、その後は一定となり、DF と似た傾向を示すことがわかった。これは、プール部ガス中にエアロゾルが漂うことで、環境へ放出するエアロゾル質量が見かけ上変わったためであると考えられる。このことを考えると、プール部水中からガス中への質量流量である  $G_2$  が以下の項に分解される。

$$G_2 = G_2(+) - G_2(-) \quad (51)$$

ここで、 $G_2(+)$  はプール水中からガス中への流量、 $G_2(-)$  はガス中から重力沈降等で逆流する流量を示す。この  $G_2(-)$  の影響により、DF と DF' で解析開始時に異なる値となったと考えられる。

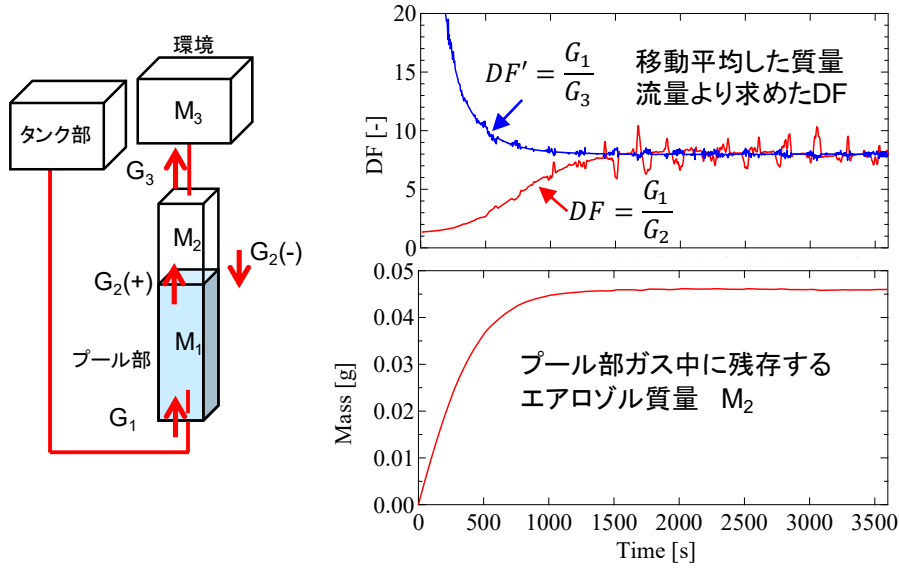


図 3-148 質量流量から求めた DF とプール部ガス中に残存するエアロゾル質量

MELCOR では  $G_2(-)$  のような、エアロゾルの堆積や沈降、落下を表現するために、MAEROS と呼ばれるコードを用いている。MAEROS において、エアロゾル密度  $Q_{l,k}$  の時間変化は以下の式で表される。

$$\begin{aligned}
 \frac{dQ_{l,k}}{dt} = & \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{l-1} \sum_{i=1}^{l-1} \left[ {}^1a \bar{\beta}_{i,j,l} Q_{j,k} Q_i + {}^1b \bar{\beta}_{i,j,l} Q_i Q_j \right] \\
 & - \sum_{j=1}^{l-1} \left[ {}^2a \bar{\beta}_{i,l} Q_i Q_{l,k} - {}^2b \bar{\beta}_{i,l} Q_l Q_{i,k} \right] \\
 & - \frac{1}{2} {}^3 \bar{\beta}_{l,l} Q_l Q_{l,k} - Q_{l,k} \sum_{i=l+1}^m {}^4 \bar{\beta}_{i,l} Q_i + {}^1 \bar{G}_{l,k} Q_l \\
 & - \sum_{i=1}^{N_a} \left[ {}^2 \bar{G}_{l,k} Q_{i,k} - {}^2 \bar{G}_{l\pm 1,i} Q_{l\pm 1,k} \right] + {}^3 \bar{G}_{l\pm 1,k} Q_{l\pm 1} + \bar{S}_{l,k} - \bar{\mathfrak{R}}_{l,k}
 \end{aligned} \tag{52}$$

ここで、 $k$  はエアロゾルの要素、 $l$  はエアロゾルのあるサイズ区間、 $\bar{\beta}$  は凝集あるいは凝固による係数、 $\bar{G}$  はガスから粒子への凝縮あるいは蒸発の係数、 $\bar{S}$  はソース項、 $\bar{\mathfrak{R}}$  は除去項を示す。 $\bar{\mathfrak{R}}$  は、重力沈降やブラウン運動、熱泳動、拡散泳動の速度の合計を用いて、以下の式により得られる。

$$\bar{\mathfrak{R}}_{l,k} = \sum_{j=1}^{N_{str}} K_{j,l} Q_{l,k} \tag{53}$$

$$K_{j,l} = \frac{A_j}{V} (V_{grav} + V_{diff} + V_{therm} + V_{diffsio}) \tag{54}$$

ここで、 $N_{str}$ はエアロゾルが沈着する構造物あるいは/またはプールの表面の総数、 $K_{j,l}$ は構造物における沈着率、 $A_j$ は構造物  $j$  の表面積、 $V$ はコントロールボリュームの気相体積である。また、 $V_{grav}$ は重力沈降による速度、 $V_{diff}$ はブラウン拡散による速度、 $V_{therm}$ は熱泳動による速度、 $V_{diffsio}$ は拡散泳動による速度である。

重力沈降による速度は以下の式で与えられる。

$$V_{grav} = \frac{d_p^2 \rho_g g C_m}{18 \mu \chi} \quad (55)$$

ここで、 $d_p$ は粒子直径、 $\rho_p$ は粒子密度、 $g$ は重力加速度、 $C_m$ は粒子移動度、または非連続効果を満たすためにストークス抗力を減少させる Cunningham すべり補正係数を示す。

ブラウン拡散による速度は以下の式で与えられる。

$$V_{diff} = \frac{\sigma T C_m}{3 \pi \mu \chi d_p \Delta} \quad (56)$$

ここで、 $\sigma$ はボルツマン定数、 $T$ は気相温度、 $\mu$ は粘度、 $\chi$ は動的形状係数、 $\Delta$ はユーザ指定の拡散境界層を示す。

熱泳動による速度は以下の式で与えられる。

$$V_{therm} = \frac{3 \mu C_m \left( c_t Kn + \frac{k_{gas}}{k_p} \right)}{2 \chi \rho_{gas} T (1 + 3 F_{slip} Kn) \left( 1 + 2 c_t Kn + \frac{k_{gas}}{k_p} \right)} \nabla T \quad (57)$$

ここで、 $Kn$ はクヌーセン数( $2\lambda/d_p$ )、 $k_{gas}/k_p$ はガスとエアロゾル粒子の熱伝導率比、 $\nabla T$ は構造物表面の温度勾配、 $\rho_{gas}$ はガス密度、 $T$ は壁面温度、 $F_{slip}$ はすべり係数、 $C_t$ は熱適応係数と関連した定数を示す。

拡散泳動による速度は以下の式で与えられる。

$$V_{diffusio} = \left( \frac{\sqrt{M_s}}{X_s \sqrt{M_s} + X_{NC} \sqrt{M_{NC}}} \right) \left( \frac{W_{cond}}{\rho_b} \right) \quad \text{if } W_{cond} \geq 0 \text{ (condensation)}$$

$$V_{diffusio} = \frac{W_{cond}}{\rho_s} \quad \text{if } W_{cond} < 0 \text{ (evaporation)} \quad (58)$$

ここで、 $M_s$ は水の分子量、 $M_{NC}$ は空気などの非凝縮性ガスの分子量、 $W_{cond}$ は界面への凝縮質量流束、 $\rho_b$ はバルクガスの密度、 $\rho_s$ は水蒸気の飽和密度、 $X_s$ はバルクガス中の水蒸気の実分率、 $X_{NC}$ はバルクガス中の非凝縮性ガスの実分率を示す。

以上の調査から、MAEROSによりエアロゾルの堆積や沈降、落下が計算されていることがわかった。今後は、MAEROSによりどの程度エアロゾルの挙動に影響を与えるのか、MAEROS内のコードを読み解いていくことで、エアロゾルの挙動に関して量的な評価をする必要がある。

### 3.3.6. 蒸気-水系におけるプールスクラビング解析

空気-水系として解析していた条件に対して、蒸気-水系とした際の除染効果への影響を調べるため、蒸気-水系におけるプールスクラビング解析を実施した。蒸気-水系となることで、次式の DF に関する式に対して、蒸気凝縮による DF が変化することが考えられる。

$$DF_{OV,i} = DF_{EC} \times DF_{II,i} \times DF_{ER,i} \times DF_{SR,i} \quad (59)$$

次に  $DF_{EC}$  の計算について述べる。まず、蒸気凝縮後の放射性物質濃度を次式で計算する。

$$X_o = 1 - \frac{P_{sat}(T_p)}{P_{surf} + \rho g h_p} \quad (60)$$

ここで、 $X_o$  は平衡後の非凝縮性ガスのモル分率、 $P_{sat}(T_p)$  は  $T_p$  における蒸気の飽和圧力、 $P_{surf}$  は水面の液相圧力、 $\rho$  は水の密度、 $g$  は重力加速度、 $h_p$  は水深を示す。 $X_o$  を用いて  $DF_{EC}$  は次式で与えられる。

$$DF_{EC} = \frac{X_o}{X_i} \quad (61)$$

ここで、 $X_i$  は非凝縮性ガスの入口モル分率を示す。さらに、ヨウ素の凝縮による気泡中の残存を考慮して、次式で再計算される。

$$DF_{EC,vap} = 1 + \min[H_{vap} \left( \frac{\rho_v}{\rho_l} \right), 1] (DF_{EC} - 1) \quad (62)$$

つぎに、非凝縮性ガスの入口モル分率  $X_i$  を解析条件から見積もり、 $DF_{EC}$  を求める。 $X_i$  は次式で与えられる。

$$X_i = \frac{P_{nc}}{P_{total}} = \frac{n_{nc}}{n_{nc} + n_{vap}} \quad (63)$$

ここで、 $P_{nc}$  は非凝縮性ガスの分圧、 $P_{total}$  は全圧、 $n_{nc}$  は非凝縮性ガスのモル数、 $n_{vap}$  は蒸気のモル数を示す。また、湿度は以下の式で与えられる。



$$\frac{P_{vap}}{P_{sat}(T)} \times 100 \quad (64)$$

ここで、 $P_{vap}$ は蒸気分圧である。 $X_i$ と湿度の式より以下の式が導かれる。

$$X_i = \frac{n_{nc}}{n_{nc} + n_{vap}} = \frac{P_{nc}}{P_{total}} = \frac{P_{total} - P_{vap}}{P_{total}} = 1 - \frac{P_{vap}}{P_{total}} \quad (65)$$

ここで、この解析では飽和蒸気であり、 $P_{total}=P_{sat}$ が成り立つため、

$$X_i = \frac{n_{nc}}{n_{nc} + n_{vap}} = 1 - \frac{P_{vap}}{P_{sat}} \quad (66)$$

となる。この式を用いて、 $DF_{EC}$ を各条件で求めた結果を表 3-19 に示す。表より、Case1 と Case4 では空気-水系であるため  $DF_{EC}$ は 1 となった。対して、Case3 と Case6 では蒸気単相であり、非凝縮性ガスが含まれていないため、 $DF_{EC}$ は $\infty$ となった。Case2 では、蒸気他に非凝縮性ガスである  $N_2$  が 50%含まれているため、 $DF_{EC}$ が 1.93 となった。またプール水温を上げた Case5 では、蒸気の凝縮が抑えられるため  $DF_{EC}$ は 1 となった。

表 3-19 解析条件ごとの  $DF_{EC}$

	流体	プール水温	モル分率 $X_i$	モル分率 $X_o$	$X_o/X_i$	$DF_{EC}$
Case 1	空気	300 K	1	0.97	0.97	1
Case 2	$N_2$ , 蒸気	300 K	0.5	0.97	1.93	1.93
Case 3	蒸気	300 K	0	0.97	$\infty$	$\infty$
Case 4	空気	363.15 K	1	0.36	0.35	1
Case 5	$N_2$ , 蒸気	363.15 K	0.5	0.36	0.71	1
Case 6	蒸気	363.15 K	0	0.36	$\infty$	$\infty$

表 3-19 の各解析条件の各ボリューム中のエアロゾル質量を図 3-149 に示す。青線は Case1 と Case4 の空気の解析結果、赤線は Case2 と Case5 は  $N_2$  と蒸気が湿度 50%の解析結果、緑線は Case3 と Case6 は蒸気単相の解析結果、実線はプール水温 300 K、破線はプール水温 363 K の結果を示す。図 3-149(a)より、蒸気の場合では、環境へエアロゾルが放出されていないことがわかる。また空気の場合には、環境へエアロゾルが放出されており、 $N_2$  と蒸気の場合には、空気の場合に比べエアロゾルが放出する量は減ったことがわかる。また、プール水温が高い場合のほうがよりエアロゾルが環境に放出されていることがわか

る。つぎに、図 3-149(b)より、プール部ガス中に残存するエアロゾル質量は時間変化せず一定となることがわかる。図 3-149(c)より、どの解析条件においてもプール部水中にエアロゾルが捕集されていることがわかる。

図 3-150 に各解析条件の各ボリューム間のエアロゾル質量流量を示す。図 3-150 (a)より、空気の場合が最も質量流量が大きく、つぎに  $N_2$  と蒸気となり、蒸気の場合には質量流量は 0 となった。また、プール水温が高いほうが質量流量は高い傾向となった。図 3-150 (b)も同様に、空気の場合が最も質量流量が大きく、つぎに  $N_2$  と蒸気となり、蒸気の場合には質量流量は 0 となった。また、プール水温が高いほうが質量流量は高い傾向となった。図 3-150 (c)より、質量流量は解析条件での違いは見られなかった。これは、境界条件としてノズル部流速を一定としており、解析条件によらず、あるエアロゾル濃度を持った流体が流速一定でプール部に流入するためであると考えられる。

図 3-151 に除染係数  $DF$  の解析結果を示す。図 3-151(a)より、蒸気の場合には  $DF_{EC}$  が  $\infty$  となるため、MELCOR での  $DF$  の最大値である  $10^{12}$  となった。空気の場合には凝縮性ガスがなく  $DF_{EC}$  は 1 となるため、 $DF$  は  $N_2$  と蒸気の場合よりも小さくなった。質量流量から求めた  $DF$  の結果である図 3-151(a)と MELCOR から出力される  $DF$  である図 3-151 (b)を比較すると、蒸気の場合には値は一致したが、 $N_2$  と蒸気の場合と空気単相の場合には質量流量から求めた結果のほうが  $DF$  の値としては大きくなった。これは、MELCOR から出力される  $DF$  ではプールスクラビングによる  $DF$  のみを計算しているのに対し、質量流量から求めた  $DF$  ではプール部でエアロゾルの堆積や落下などのため、環境に放出されるエアロゾルが少なくなることで、質量流量から求めた  $DF$  が大きくなったと考えられる。この質量流量から求めた  $DF$  と MELCOR から出力される  $DF$  について、今後さらに検討を進めていく必要があると思われる。

図 3-152 にプール水温を変えた際の除染係数  $DF$  の比較を示す。図 3-152 より、プール水温が低いほうが  $DF$  としては高い値となっていることがわかる。これは、プール水温が低いほうが蒸気はより凝縮しやすくなるため、 $DF_{EC}$  が高くなり、全体の  $DF$  が高くなったと考えられる。

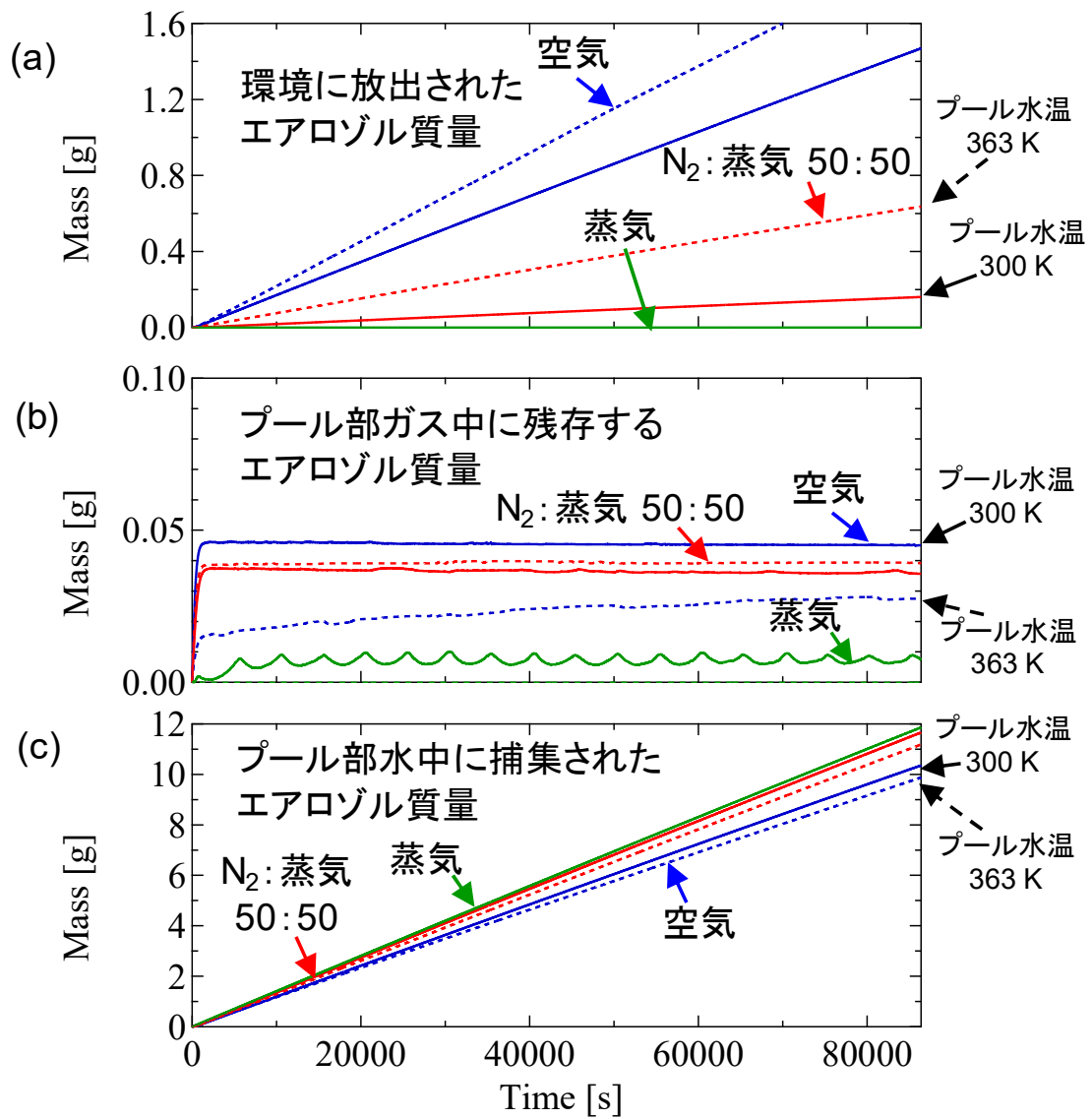


図 3-149 各ボリューム中のエアロゾル質量

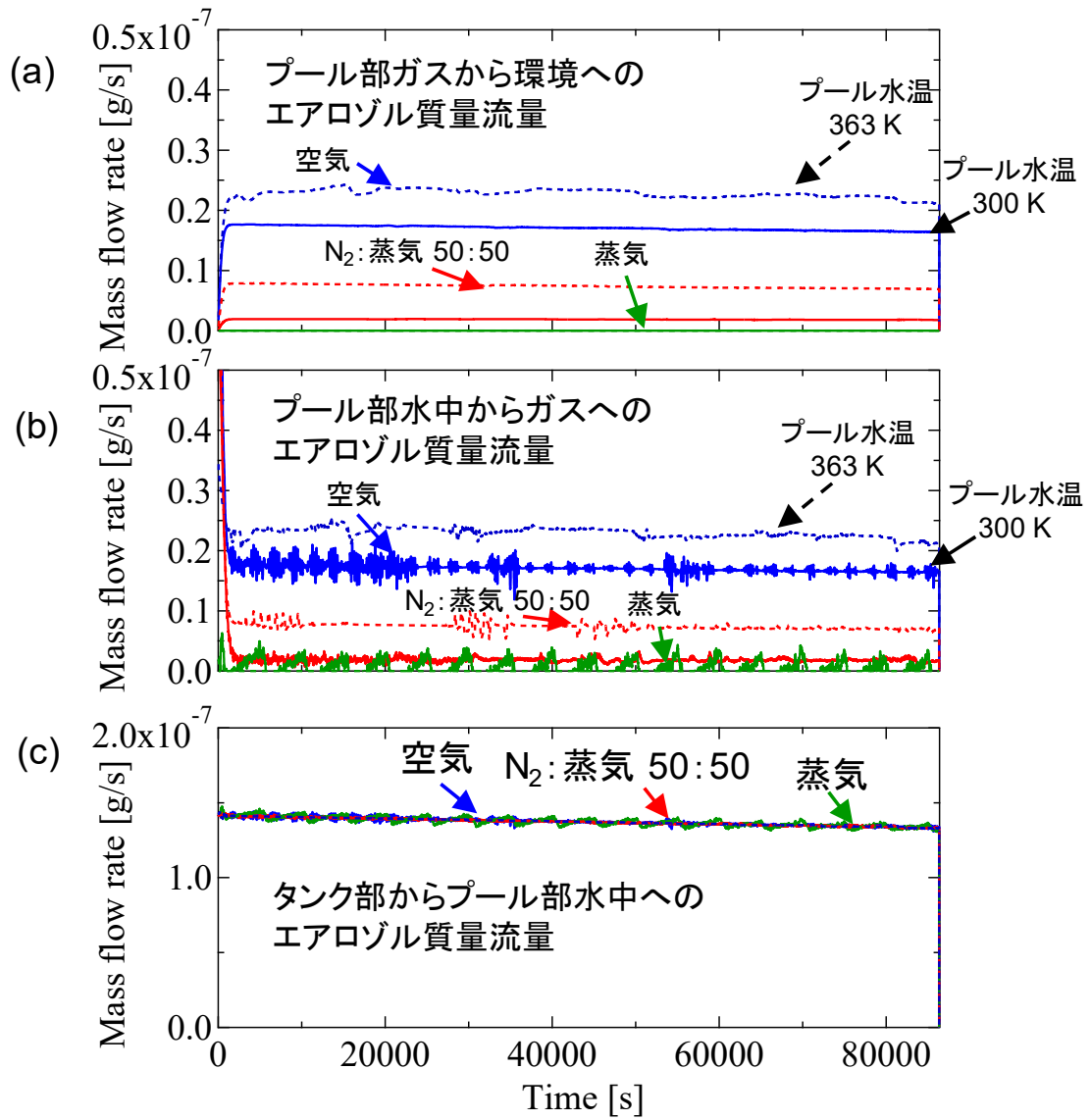


図 3-150 各ボリューム間のエアロゾル質量流量

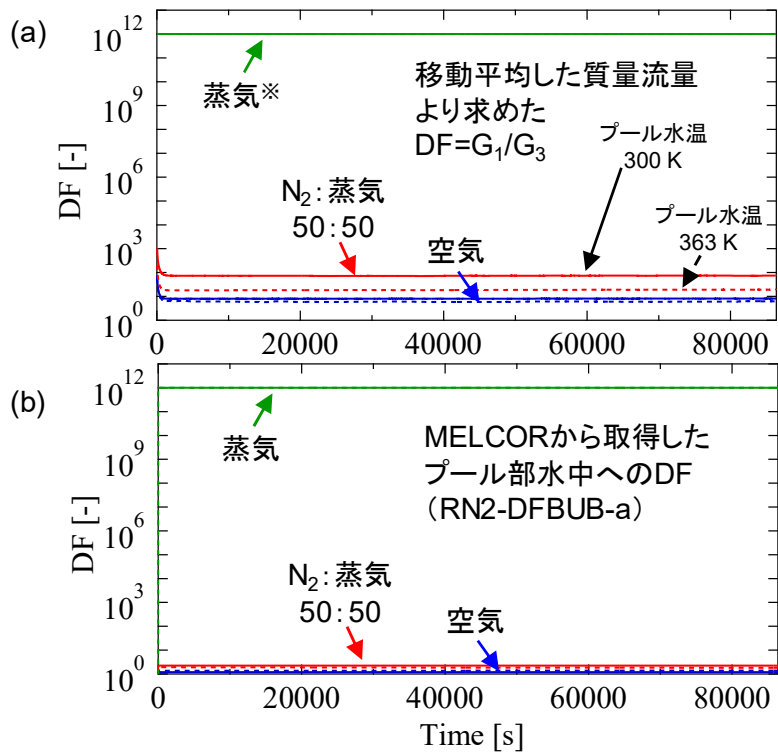


図 3-151 除染係数の解析結果

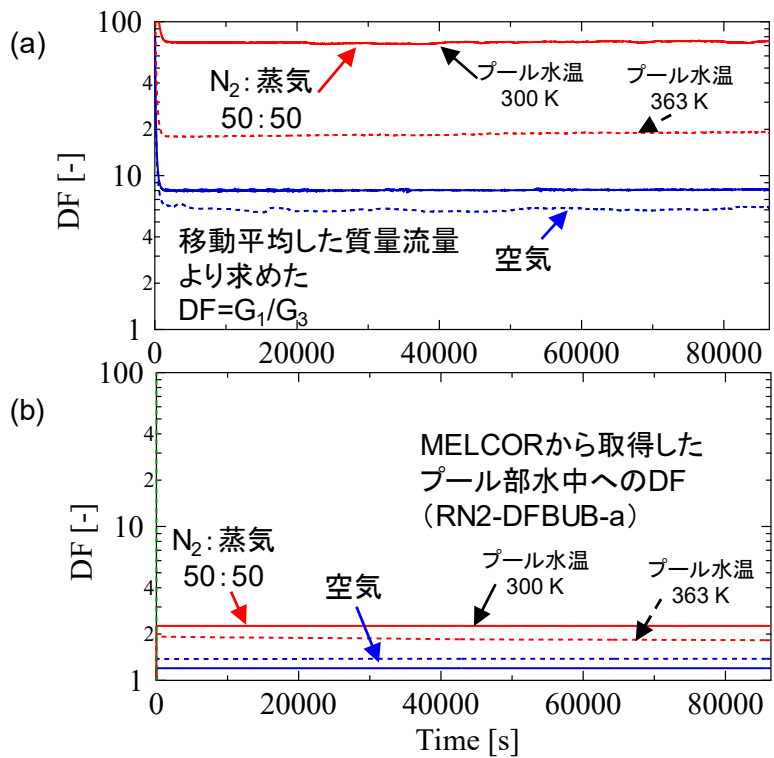


図 3-152 プール水温を変えた際の除染係数

## 文献目録

- [1] R. O. Gauntt, R. K. Cole, C. M. Erickson, R. G. Gido, R. D. Gasser, S. B. Rodriguez and M. F. Young, MELCOR Computer Code Manuals, NUREG/CR-6119, vol. 2, 2000.
- [2] M. J. M. Hill, On a Spherical Vortex, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, pp. 213-245, Vol.185, 1894.
- [3] Demitrack, T., and F. J. Moody. Planetary ellipsoid bubble model for fission product scrubbing, Transactions of the American Nuclear Society, pp.483-485, Vol. 45, 1983.
- [4] Higbie, Ralph, The rate of absorption of a pure gas into a still liquid during short periods of exposure, Trans. AIChE, pp. 365-389, Vol. 31, 1935.
- [5] P. C. Owczarski and K. W. Burk, SPARC-90: A Code for Calculating Fission Product Capture in Suppression Pools, NUREG/CR-5765, pp. 57-65, 1991.
- [6] Wellek, R.M., Agrawal, A.K., Skelland, A.H.P., Shape of liquid drops moving in liquid media, AIChE J., pp. 854-862, Vol.12, 1966.
- [7] Zuber, Novak, and JAa Findlay, Average volumetric concentration in two-phase flow systems, Journal of heat transfer, pp. 453-468, vol.87.4, 1965.
- [8] A. Tomiyama, G.P. Celata, S. Hosokawa, S. Yoshida Terminal velocity of single bubbles in surface tension force dominant regime. J. Multiphase Flow, pp. 1497-1519, vol.28, 2001.
- [9] Y. Tagawa, A. Funakubo, S. Takagi, Y. Matsumoto, 界面活性剤溶液中を 3 次元運動する単一気泡の挙動 (第 2 報: 準定常運動する気泡に働く力とスリップ条件), 日本機械学会論文集 B 編, pp. 723-733, Vol. 78-788, 2012.
- [10] T. Kanai, M. Furuya, T. Arai, K. Shirakawa, ワイヤメッシュセンサの流れ場への影響と適用範囲の評価, 電力中央研究所, 研究報告 L10003, 2011.
- [11] K. Yamamoto et al., Bubble dynamics with aerosol in swarm flow during pool scrubbing, Proceedings of the 10th Japan-Korea symposium on nuclear thermal hydraulics and safety, 2016.



**リサイクル適性** (A)

この印刷物は、印刷用の紙へ  
リサイクルできます。