

原子力規制委員会
原子力規制庁
長官官房参事官 殿

平成 27 年度 研究成果報告書

平成 27 年度原子力施設等防災対策委託費
(スクラビング個別効果試験) 事業

筑波大学

阿部 豊

目次

1. 委託業務題目	2
2. 委託業務の目的	2
3. 委託業務の内容	2
3.1 試験装置のコンセプト	3
3.2 単一気泡によるエアロゾル挙動測定試験	7
3.2.1 装置構成及び計測機器	7
3.2.1.1 実験装置概要	7
3.2.1.2 ステレオ撮影	8
3.2.1.3 気泡の追従撮影	12
3.2.2 実験条件・作動流体・実験パラメータ	13
3.2.3 計測項目	13
3.2.3.1 気泡形状(重心位置, 重心軌道, 径を評価)	15
3.2.3.2 気泡及びエアロゾル粒子の速度分布	18
3.2.3.3 エアロゾル濃度及びその変化(気泡内外)	24
3.2.3.4 気相体積	24
3.2.3.5 液温及び気相温度(試験装置内で複数点, 大まかな空間分布)液相内で温度成層化を形成させる場合は, 高さ方向の液温温度分布(詳細分布)	25
3.2.4 実験データの整理	27
3.2.4.6 スウーム上昇領域中のエアロゾル粒子の速度比較	27
3.2.4.7 粒子径が及ぼす気泡内粒子速度への影響	39
3.2.5 まとめ	47
3.3 気泡2相流挙動評価時実験装置の製作及び試験	49
3.3.1 実験手法の検討	52
3.3.2 試験装置の製作	53
3.3.2.1 試験部容器	55
3.3.2.2 架台	65
3.3.2.3 計測可動部	68
3.3.2.4 気相供給系	70
3.3.2.5 給排水系	71
3.3.3 計測機器	74
3.3.3.1 高速度カメラ	74
3.3.3.2 ボイド率測定機器	76
3.3.4 試験条件・作動流体・試験パラメータ	83
3.3.5 計測項目	83
3.3.6 試験データの整理	83
3.3.6.1 気泡の径、形状及び流速の分布	83
3.3.6.2 気泡塊(クラスタ又はプルーム)の平均上昇速度*要開発項目	90
3.3.6.3 ボイド率分布*要開発項目	91
3.3.6.4 界面積濃度*要開発項目	91
3.3.6.5 界面又は液面から発生する液滴の径及び速度の分布*要開発項目	92

3.3.6.6	気泡の 2 相流流動様式の特定制及び合体・分裂挙動の把握のための可視化情報	93
3.3.6.7	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）*要開発項目	94
3.3.6.8	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）*要開発項目	94
3.3.7	まとめ	95
3.4	MELCOR による DF 解析	96
3.4.1	プールスクラビングによる DF 解析の概要	96
3.4.2	プールスクラビングに関する流動モデル概要	98
3.4.3	プールスクラビングに係る除染モデル概要	100
3.4.4	温度成層解析体系の検討	101
3.4.5	解析体系および解析条件	101
3.4.6	DF に対する節点数の影響	105
3.4.7	DF に対する CV 間接続方法の影響	106
3.4.8	温度成層を模擬した場合の DF に対する CV 間接続方法の影響（上部下端下部上端）	107
3.4.9	温度成層を模擬した場合の DF に対する CV 間接続方法の影響（中心間）	108
3.4.10	まとめ	110
	文献目録	111

図目次

図 3-1	原子力発電所におけるスクラビング例	4
図 3-2	プールスクラビングにおけるエアロゾル挙動および二相流挙動	4
図 3-3	研究アプローチ法	5
図 3.4	実験体系概要	8
図 3.5	ステレオ撮影方法	9
図 3.6	キャリブレーションシステム	10
図 3.7	キャリブレーション方法	10
図 3.8	気泡生成挙動のステレオ撮影	11
図 3.9	粒子を含んだ気泡の生成時の三次元 PIV	11
図 3.10	上下動システム	12
図 3.11	追従撮影方法	13
図 3.12	気泡の重心軌道	16
図 3.13	気泡の形状変化	16
図 3.14	上昇気泡の軌跡	17
図 3.15	気泡の長軸及び短軸の時間変化	17
図 3.16	微粉末シリカ粒子の仕様	19
図 3.17	エクспанセル粒子の仕様	19
図 3.18	ステレオ撮影体系	20
図 3.19	上昇気泡位置の比較	20
図 3.20	気泡内粒子の速度ベクトル	21
図 3.21	気泡内粒子速度の三次元可視化	21
図 3.22	ステレオ PIV にて求めた粒子速度	22
図 3.23	気泡内粒子速度の実測	23
図 3.24	PIV と実測にて求めた粒子速度の比較	23
図 3.25	気泡界面の画像処理計測	24
図 3.26	上昇気泡の体積変動	25
図 3.27	液温温度分布計測法	26
図 3.28	SPARC-90 における気泡モデル	30
図 3.29	気泡界面の画像処理計測	30
図 3.30	気泡の中心から粒子までの角度	31
図 3.31	上昇気泡内粒子の二次元 PTV との速度比較	31
図 3.32	気泡の表面速度との比較	32
図 3.33	気泡内粒子の軌跡	32
図 3.34	気泡中の粒子の角度と β の変化	33
図 3.35	気泡中の粒子の角度と $\cos\beta$ の変化	34
図 3.36	気泡中の粒子の角度と r の変化	35
図 3.37	気泡中の粒子の角度と V_s	36
図 3.38	気泡中の粒子の角度と rc の変化	37
図 3.39	気泡中の粒子の角度と $V_{c,i}$ の変化	38
図 3.40	気泡中の粒子の角度と粒子の速度 $V_{n,i}$ の変化	39

図 3.41	エクспанセル粒子の仕様	41
図 3.42	エクспанセル粒子の可視化	41
図 3.43	エクспанセル粒子の軌跡	42
図 3.44	気泡内粒子の速度	42
図 3.45	気泡内粒子の軌跡	43
図 3.46	気泡内粒子の速度	43
図 3.47	粒子(赤)の速度と計算値の比較	44
図 3.48	粒子(赤)の速度と表面速度の比較	44
図 3.49	粒子(青)の速度と計算値の比較	45
図 3.50	粒子(青)の速度と表面速度の比較	45
図 3.51	粒子(緑)の速度と計算値の比較	46
図 3.52	粒子(緑)の速度と表面速度の比較	46
図 3.53	粒子径 d_i と粒子速度との比較	47
図 3-54	気泡の 2 相流挙動評価実験装置 試験部概念図	49
図 3-55	実験手法の検討	52
図 3-56	昨年度製作した単一気泡挙動測定実験装置の系統図	53
図 3-57	今年度製作した二相流挙動評価実験装置を追加した全体の系統図	54
図 3-58	気泡の 2 相流挙動評価実験 試験部概要図	54
図 3-59	ノズル設計図	58
図 3-60	ノズル写真	58
図 3-61	横吹き気泡噴流予備実験体系	59
図 3-62	各ノズル内径の気泡噴流挙動(気相見かけ速度=50m/s)	59
図 3-63	各見かけ流速の気泡噴流挙動(ノズル内径=φ3/外径=φ5mm)	60
図 3-64	Themelis らの実験式との比較(ノズル内径 3mm, ノズル見かけ流速 300m/s)	60
図 3-65	サブマージェンス 1000mm における各流量の上昇気泡群挙動	61
図 3-66	ワイヤメッシュセンサによるボイド率計測位置	61
図 3-67	ノズル間隔の確認	62
図 3-68	決定した水槽寸法	62
図 3-69	ワイヤメッシュセンサ接続方法	63
図 3-70	水槽 1 設計図	63
図 3-71	水槽 1 写真	64
図 3-72	水槽 2 設計図	64
図 3-73	水槽 2 写真	65
図 3-74	架台 設計図	66
図 3-75	架台 写真	67
図 3-76	計測可動部 設計図	68
図 3-77	計測可動部 写真	69
図 3-78	ボイラー及び軟水器	70
図 3-79	試験部水槽への給湯方法	71
図 3-80	電気温水器 写真	71
図 3-81	試験部への配管系統図	72
図 3-82	シーズヒーター設置案	73

図 3-83	高速度カメラ写真.....	74
図 3-84	ワイヤメッシュセンサ概要図.....	77
図 3-85	ワイヤメッシュセンサ一式.....	78
図 3-86	電気系統図.....	78
図 3-87	流れ場測定の予備実験体系.....	79
図 3-88	PIV による流れ場の測定結果.....	80
図 3-89	ワイヤによる気泡の影響確認の予備実験体系.....	80
図 3-90	実験結果.....	80
図 3-91	粒子混入による電気伝導率確認の予備実験体系.....	81
図 3-92	電気系統図.....	81
図 3-93	ワイヤメッシュセンサ 設計図.....	82
図 3-94	ノズル出口付近における気泡挙動.....	85
図 3-95	アスペクト比の定義.....	85
図 3-96	対象画像.....	86
図 3-97	算出画像.....	86
図 3-98	気泡径分布.....	87
図 3-99	高さによる気泡数の変化.....	87
図 3-100	気泡アスペクト比と MELOCR 計算式との比較.....	88
図 3-101	4.2mm 気泡の上昇速度計測結果.....	88
図 3-102	10.2mm 気泡の上昇速度計測結果.....	89
図 3-103	気泡上昇速度と MELCOR 計算式の比較.....	89
図 3-104	気泡塊の上昇速度の試算.....	90
図 3-105	水面での液滴飛散挙動.....	92
図 3-106	気泡の分裂挙動.....	93
図 3-107	気泡の合体挙動.....	93
図 3-108	熱電対設置箇所.....	94
図 3-109	エアロゾルの質量分布 [1].....	97
図 3-110	SPARC-90 における流動モデル.....	98
図 3-111	SPARC-90 における気泡モデル.....	99
図 3-112	SPARC-90 における除染モデル.....	100
図 3-113	解析体系.....	102
図 3-114	2 節点の CV 接続方法 1.....	102
図 3-115	2 節点の CV 接続方法 2.....	103
図 3-116	解析体系の主要なパラメータおよびエアロゾルの入力値.....	103
図 3-117	MELCOR による DF に対する節点数の影響.....	105
図 3-118	DF に対する CV 間接続方法の影響.....	106
図 3-119	DF に対する温度成層模擬の影響.....	107
図 3-120	温度成層を模擬した場合の DF に対する CV 間接続方法の影響.....	109
図 3-121	温度成層を模擬した場合の温度に対する CV 間接続方法の影響.....	109

表目次

表 3-1	気泡の 2 相流挙動評価実験基本仕様	50
表 3-2	電気温水器 仕様	72
表 3-3	高速度カメラ仕様.....	74
表 3-4	各粒子の試験部抵抗値	81
表 3-5	解析条件	104

1. 委託業務題目

平成 27 年度原子力施設等防災対策等委託費（スクラビング個別効果試験）事業

2. 委託業務の目的

現状の PWR プラントでは、蒸気発生器伝熱管破損事故等において、水中に核分裂生成物の混入したガスが流入するため、スクラビング効果により核分裂生成物の除去効果が期待できる。また、BWR の重大事故時においてもウェットウェルからの格納容器ベントを実施する際には、プール水中におけるスクラビング効果により核分裂生成物の除去効果が期待できる。しかし、福島第一原子力発電所事故においては、高温での急減圧により沸騰が発生し、必ずしも期待された効果が得られず、環境への放出量を増加させた可能性がある。シビアアクシデント発生時の環境へ放出するソースターム量を正確に評価する観点から、高温急減圧条件下等を含む幅広い条件のプール水におけるスクラビングによる核分裂生成物除去効果を定量的に評価する必要がある。一方、現状のスクラビングに関する研究は、前述のプール水の減圧沸騰条件に加え、プール水へ流入するガスの非凝縮性ガス割合の幅広い条件範囲における、エアロゾル挙動及び二相流挙動、さらに双方の詳細な相互関係についての知見が不十分である。このため、スクラビングを解析的に評価する場合に使用するモデルの高度化又は妥当性確認への試験データの活用が困難な状況が続いている。

本委託では、試験を実施して気泡とエアロゾル挙動の相互関係を詳細に調べ、核分裂生成物の除去効果を定量的に評価するための基礎データの取得を目指す。

3. 委託業務の内容

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

3.1 試験装置のコンセプト

現状の PWR プラントでは、蒸気発生器伝熱管破損事故等において、水中に核分裂生成物の混入したガスが流入するため、スクラビング効果により核分裂生成物の除去効果が期待できる。また、BWR の重大事故時においてもウェットウェルからの格納容器ベントを実施する際には、プール水中におけるスクラビング効果により核分裂生成物の除去効果が期待できる。フィルター付きベントシステムにおいては、格納容器ベント時システム内でも、ベンチュリースクラバーと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とされている（図 3-1 参照）。しかし、福島第一原子力発電所事故においては、高温での急減圧により沸騰が発生し、必ずしも期待された効果が得られず、環境への放出量を増加させた可能性がある。シビアアクシデント発生時の環境へ放出するソースターム量を正確に評価する観点から、高温急減圧条件下等を含む幅広い条件のプール水におけるスクラビングによる核分裂生成物除去効果を定量的に評価する必要がある。

一方、現状のスクラビングに関する研究は、前述のプール水の減圧沸騰条件に加え、プール水へ流入するガスの非凝縮性ガス割合の幅広い条件範囲における、エアロゾル挙動及び二相流挙動、さらに双方の詳細な相互関係についての知見が不十分である。このため、スクラビングを解析的に評価する場合に使用するモデルの高度化又は妥当性確認への試験データの活用が困難な状況が続いている。

本報告では、試験を実施して気泡とエアロゾル挙動の相互関係を詳細に調べ、核分裂生成物の除去効果を定量的に評価するための基礎データの取得を目指す。

上記の内容を踏まえて、プールスクラビングにおけるエアロゾル挙動および二相流挙動を研究対象とする。原子力発電所において考え得る、これらのエアロゾル挙動および二相流挙動を図 3-2 に示す。格納容器から配管系統を通る排気ガスは、プール中に噴出する。エアロゾルおよび二相流の挙動は、初期慣性衝突した後水蒸気凝縮が生じて凝縮しきれないガスまたは非凝縮ガスにより初期気泡が形成される。さらに初期気泡が分解し、気泡は細分化する。気泡が水面に到達すると気泡がはじけることでエントレインメント液滴の形成およびエアロゾル粒子の再飛散が生じる。水中で気泡上昇する間、気泡内においてエアロゾルの慣性衝突、重力沈降、ブラウン拡散および凝縮・蒸発による水蒸気流が生じることでエアロゾルの気泡内沈着が生じる。これらの挙動を解明するうえで確認すべき現象または素過程を表 1 に示す。気泡・液滴の内外でのエアロゾル挙動として慣性衝突や重力沈降などがあり、気泡・液滴の挙動として気泡・エントレインメント液滴の径および流速の分布や運動、界面形状等がある。これらを踏まえ、単一の上昇気泡に対して気泡内部のエアロゾル挙動、気泡（界面）の挙動、エントレインメント液滴の挙動を詳細に計測し、解明する。

研究アプローチのイメージ図を図 3-3 に示す。まず、気泡・液滴を用いたエアロゾル移行挙動に関して重要な物理量および計測項目を抽出する。解析コードの MELCOR に含まれる物理モデルを調査し、両者の妥当性を確認する。その後、実験および MELCOR を用いた解析を実施し、両者の結果を比較することでプールスクラビングにおける除染係数の支配因子について検討する。さらに必要に応じて物理モデルの式の改良を検討する。

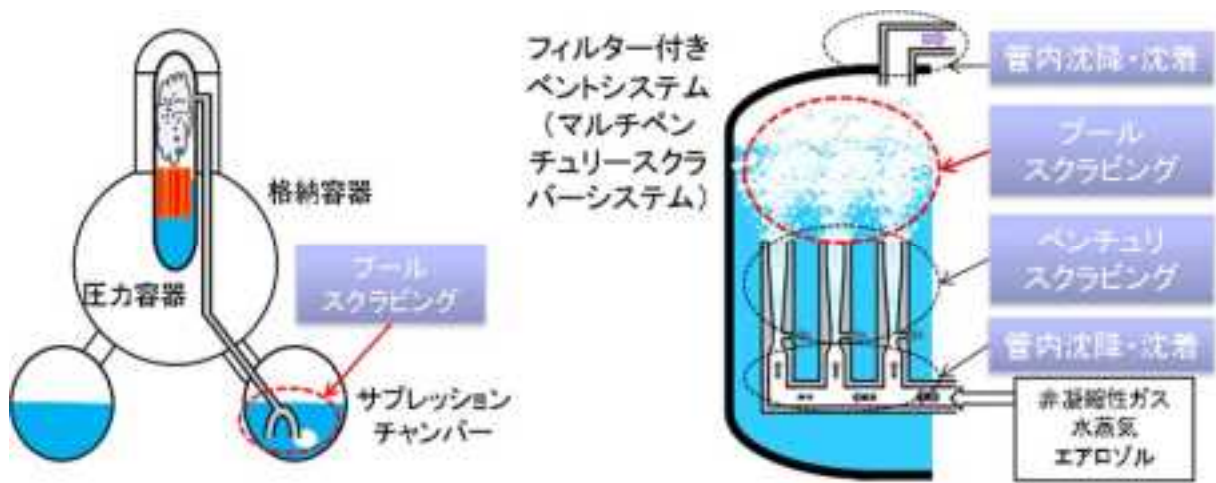


図 3-1 原子力発電所におけるスクラビング例

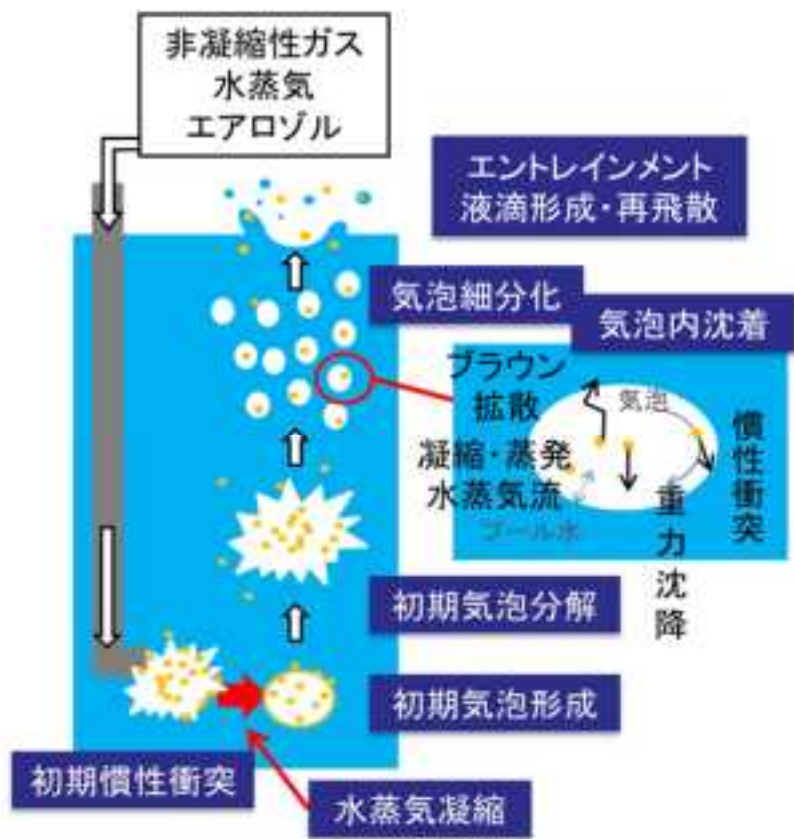


図 3-2 プールスクラビングにおけるエアロゾル挙動および二相流挙動

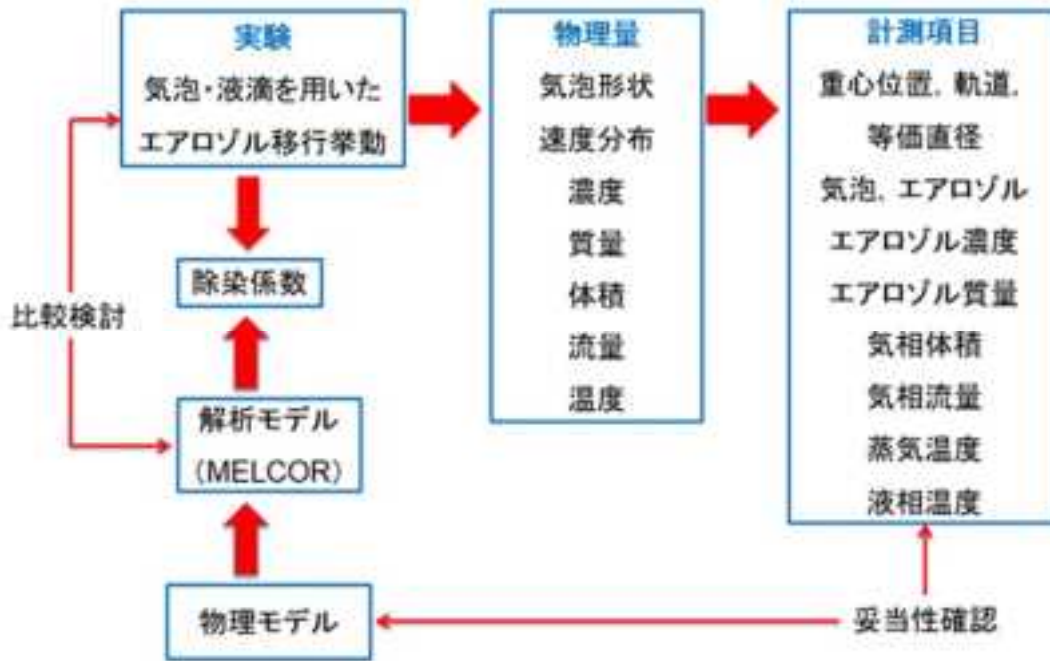


図 3-3 研究アプローチ法

3.2 単一気泡によるエアロゾル挙動測定試験

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。今年度は昨年度製作した実験装置において昨年度確立した計測技術を用い、より精度を高めた実験を実施してデータを取得し、現象理解を深めるための整理を実施する。

3.2.1 装置構成及び計測機器

実験装置は昨年度製作を行った、以下に概要を記す。

3.2.1.1 実験装置概要

昨年度製作した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試験装置を用いて試験を実施する。図 3.4 に実験体系を示す。装置構成は、コンプレッサ、窒素ポンプ、ボイラーから気相の供給を行い窒素ガス、空気に関しては蒸気と混合する前に予熱を行う。次に窒素、空気、蒸気を二つに分け一方は、エアロゾル注入部に接続されもう一方は混合部に接続される。分けられた気相は混合部にて合流し注入弁システムにて、気相流のうち単一気泡分だけ採取され試験部容器とエアロゾル計測系を含む試験部へと送り計測を行う。試験容器内では、気泡注入ノズルを用意し単一気泡を試験部容器内に放出しエアロゾル計測系にて計測を行う。計測を終えた、蒸気、窒素、空気、及びエアロゾルを含む気泡は試験部より凝縮器、排水タンクを含む排気系へと送られ安全に処理される。なお試験部への給水は、試験部容器下部から行い排水も同じく行う。計測機器は、昨年度購入した高速度カメラを用いて PIV 計測にて、気泡内のエアロゾル挙動を計測可能にした。

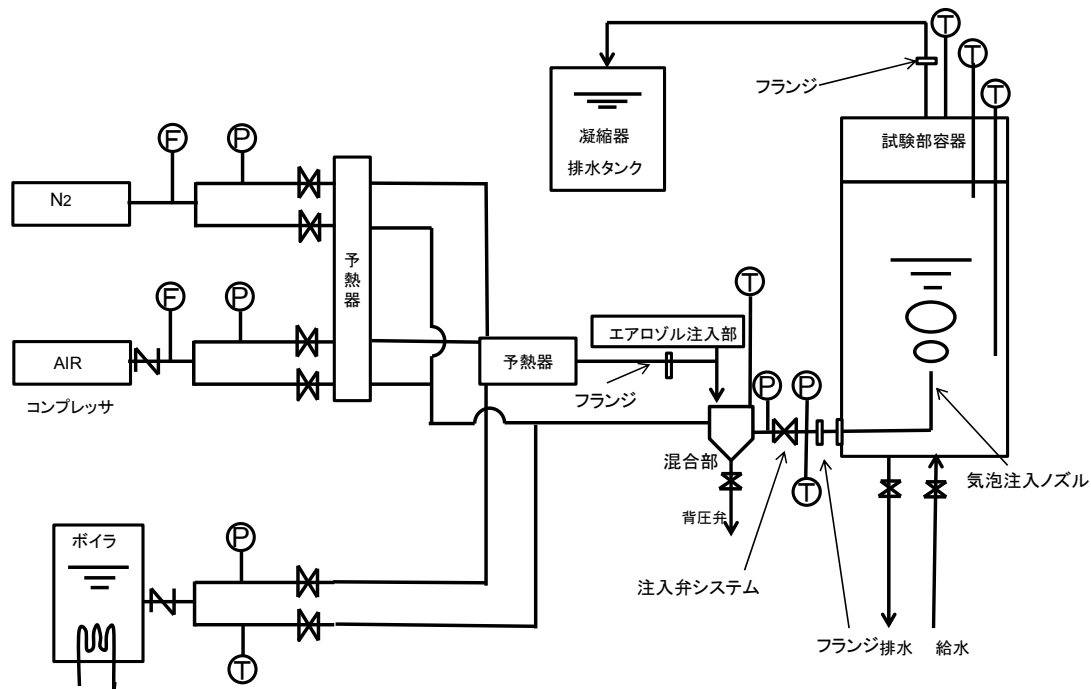


図 3.4 実験体系概要

3.2.1.2 ステレオ撮影

高速度ビデオカメラを 2 台用いてステレオ撮影を行った。試験条件は、 $5\mu\text{m}$ のフィルターでろ過した水、空気を用いて行い、エアロゾル模擬粒子として、微粉末シリカ粒子を用いた、また水温は 25°C で行った。気泡生成ノズルは外径 5mm 内径 3mm のステンレス製である。なお、光源は 5w レーザー(DPGL-5W-L)を用いて撮影を行った。

図 3.5 にステレオ撮影方法を示す。図のようにテスト部に照射されたレーザーを挟み込むようにカメラを配置し、ステレオ撮影を行い三次元 PIV を可能にした。三次元 PIV を行う際にはキャリブレーションを行う必要がある。図 3.6 にキャリブレーションシステムの写真を示す。本装置はマイクロメータ及び先端に取り付けられたキャリブレーションシートで構成されており、試験部テスト水槽の上部に設置しキャリブレーションシートを上昇架台の撮影範囲内まで下ろすことによってキャリブレーションを可能にする。図 3.7 にキャリブレーション方法を示す。図に示すようにレーザー位置を中心として上下方向に 1.0mm の間隔でトラバースし、テスト部内の 3 次元空間を構成した。具体的にはこのように観測された画像を左右に分割し、奥行き方向にトラバースした画像を用いて空間座標を構成する。三次元 PIV では、キャリブレーションを正確に行うことによって、空間座標及び速度ベクトル方向を正確に算出することができるため重要であると考えられる。

実験では前述した大型装置を用いた実験と同様に、レーザーを上下動システム下部に配置し、ミラー及びハーフミラーを用いて上部架台に送り、粒子を含む気泡に照射した。レーザー光によって気泡内の粒子が発光しその挙動を確認した。粒子が混入した気泡は、生成時に気泡体積が上昇していくのと同時に内部に粒子が混入されていく様子が確認できた。さらに、ノズルより気泡が離脱した直後には、気泡内の粒子は旋回する挙動を示した。図 3.8 に、気泡生成時のステレオ撮影画像を示す。図のようにカメラは二方向で撮影を行っているためレーザーを中心にして左側

のカメラと右側のカメラで撮影画像は異なる，しかしキャリブレーションを行っているため撮影箇所はノズル付近で合わせて撮影を行っている．図の画像では気泡内部に白い固体のようなものが確認でき，粒子が気泡内部に混入していることが確認できた．また，撮影した画像を用いて三次元 PIV 処理を行ったところ，図 3.9 に示すようにノズル付近の速度ベクトルを可視化した．速度ベクトルの可視化画像を見ると気泡内部の粒子が，高さ方向に速度ベクトルを持っていることが観察できた．また気泡内の粒子は三次元方向に縦横無尽に動く挙動を可視化することができた．この時粒子の速度は最高で 0.07m/s 程であった．これにより，ノズルから気泡が生成される場所において三次元 PIV による気泡内粒子挙動の可視化による挙動の把握が可能であることが確認できた．

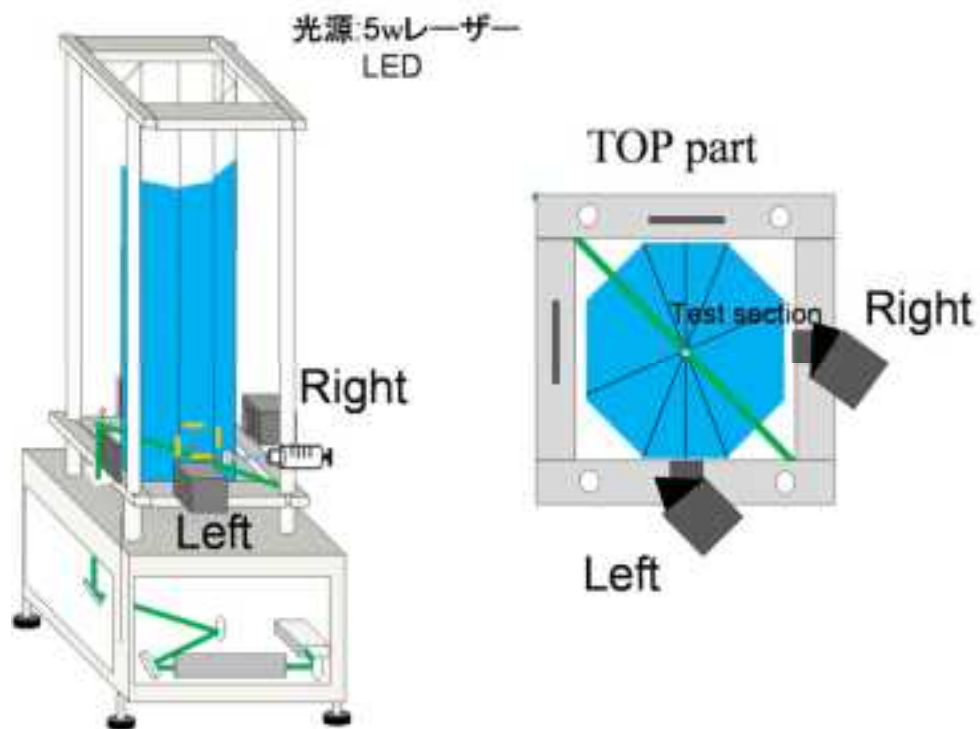


図 3.5 ステレオ撮影方法

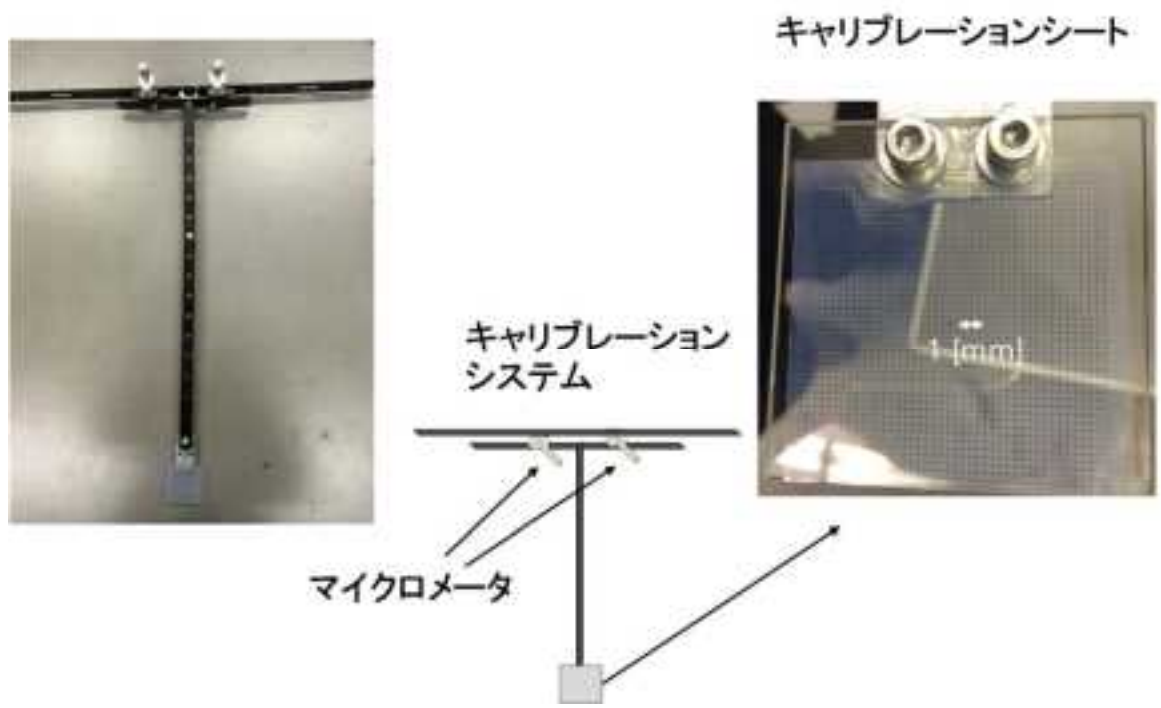


図 3.6 キャリブレーションシステム

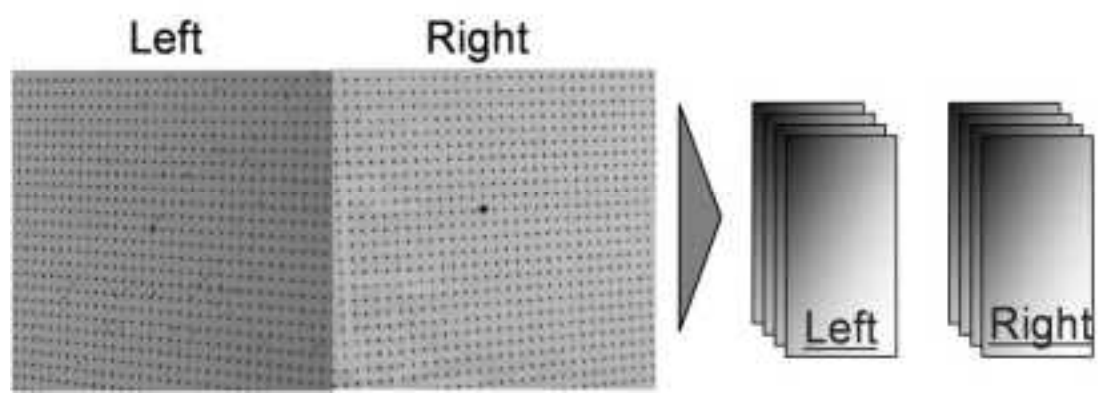


図 3.7 キャリブレーション方法

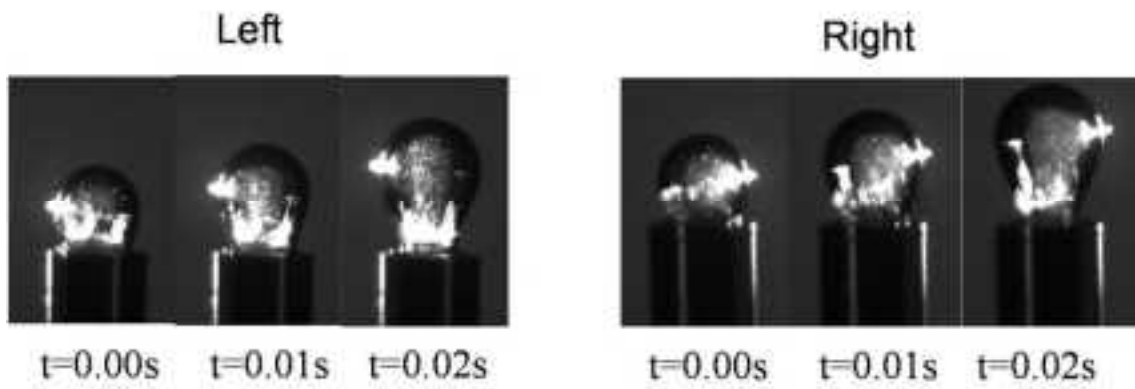


図 3.8 気泡生成挙動のステレオ撮影

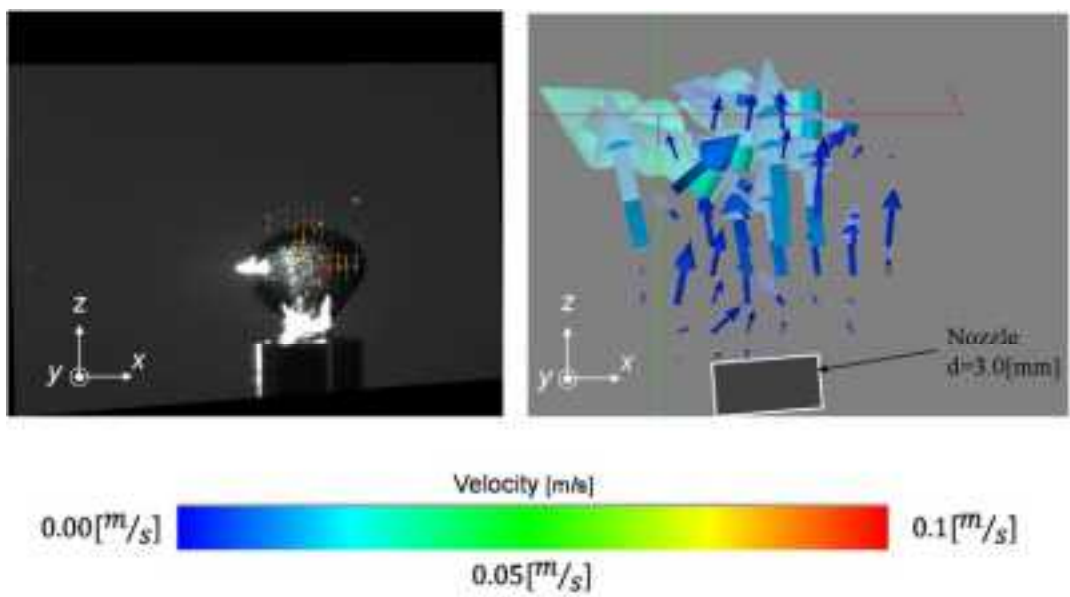


図 3.9 粒子を含んだ気泡の生成時の三次元 PIV

3.2.1.3 気泡の追従撮影

昨年度製作した上下動システムを用いて気泡の追従撮影を行った。昨年度まではオイラリアン計測のみでの気泡挙動の観察であったが、上下動システムの導入により、長時間気泡の挙動を捉えるためのカメラと光源を気泡に追従させながら計測するラグランジアン計測を可能にした[10]。試験条件は、5mmのフィルターでろ過した水、空気を用いて行い、水温は25℃で行った。図3.10に上下動システムの概要図を示す。上下動可能な架台上にLEDバックライトを設置し対面にある高速度ビデオカメラごと気泡の上昇とともに架台を上昇させ追従撮影を行った。図3.11に追従撮影の概略図を示す。架台上のカメラは、テスト部中央に位置する気泡をとらえ、架台の上昇速度が気泡の上昇速度と重なった場合、図に示す画像のように、カメラ1、カメラ2共々気泡を撮影範囲内に収めることが可能になる。架台の上昇速度が気泡と近い値をとった場合、両方のカメラにおいて気泡を画像中央にとらえることが可能であり、それによって気泡の形状変化を詳細に観察することが可能である。また、気泡内に粒子を混入することによって気泡内部の粒子の挙動も可視化観察可能である。気泡の上昇速度は気泡径に依存するが、一定の気泡径を安定的に生成することによって、架台の上昇速度を等速に設定し撮影を行う。

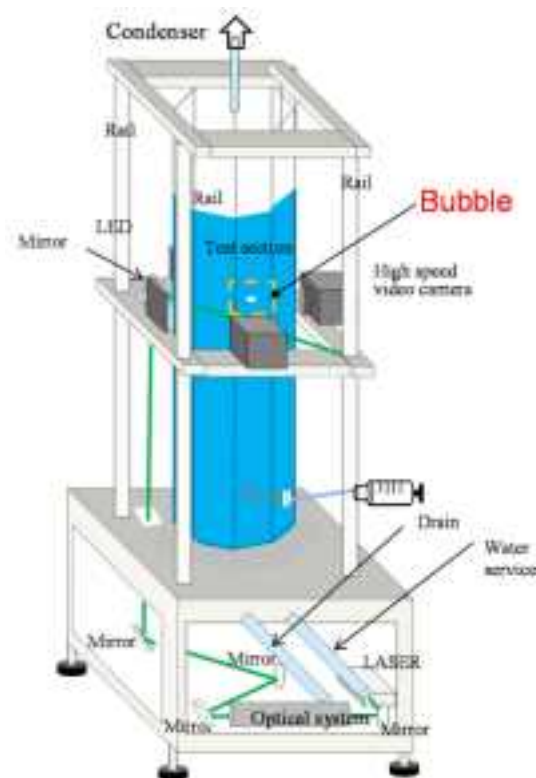


図 3.10 上下動システム

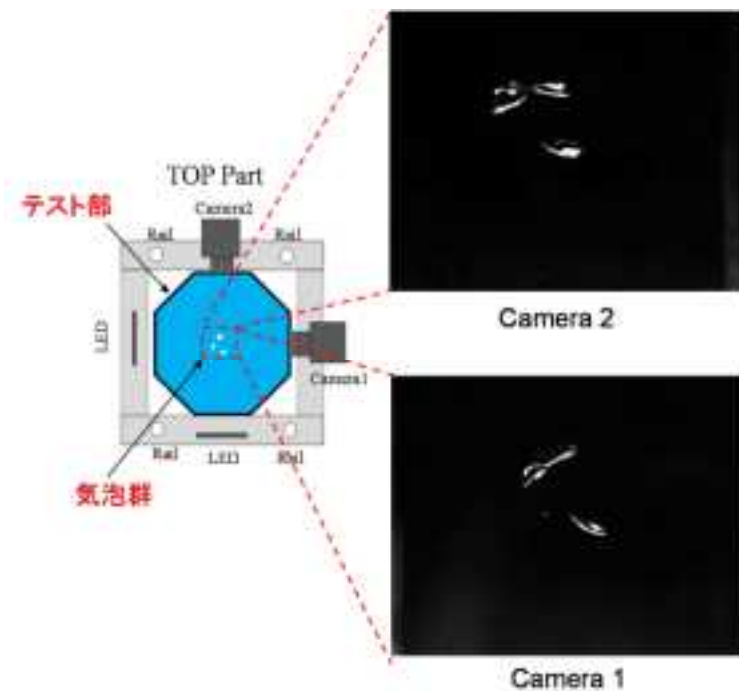


図 3.11 追従撮影方法

3.2.2 実験条件・作動流体・実験パラメータ

基本仕様を参照に、試験条件は大気圧で行い、試験部容器内の液温及び気泡内の蒸気の温度範囲は常温～100℃とする。

作動流体は、水－空気（窒素）、水－蒸気、水－蒸気－難溶解性エアロゾル（上記3条件はスケーリング特性の確認のため、水以外の作動流体も考慮可）水－蒸気－非凝縮性ガス－難溶解性エアロゾルで行う。

実験パラメータは、ガス噴出し方向：下、横、上・とし穴形状は円（基本）、破損口形状（適宜、理想化）とする。口径は、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）用意した。ガス流出速度は、0.1～1 m/s 弱で非凝縮性ガス濃度：0～100%まで調整可能である。エアロゾルの組成・粒径・濃度も計測方法を検討し計測を行う。サブクール度は液温が常温から飽和温度までの範囲とする（高さ方向に大きな温度勾配を設定する実験条件も含む）。サブマージェンスは100mm 弱～1000mm 強まで試験部容器内で調整可能である。

3.2.3 計測項目

基本仕様に記載されている計測項目は次の通りである。項目ごとに実施した計測手法および結果について順次報告する。

- 3.2.3.1 気泡形状(重心位置, 重心軌道, 径を評価)
- 3.2.3.2 気泡及びエアロゾル粒子の速度分布
- 3.2.3.3 エアロゾル濃度及びその変化(気泡内外)
- 3.2.3.4 気相体積
- 3.2.3.5 液温及び気相温度(実験装置内で複数点, 大まかな空間分布)
液相内で温度成層化を形成させる場合は, 高さ方向の液温温度分布 (詳細分布)
全て時間変化を計測

3.2.3.1 気泡形状（重心位置，重心軌道，径を評価）

上記で，述べた実験装置を用いて気泡を発生させ挙動を観察した．試験条件は， $5\mu\text{m}$ のフィルターでろ過した水，空気を用いて行い，水温は 25°C で行った．なお，光源は LED バックライトを用いており気泡を高速度ビデオカメラで可視化観測することによって，気泡の軌道及び形状変化を観察した．また，ノズルは外径 5mm 内径 3mm のステンレス製である．

カメラの撮影範囲と，気泡の軌跡を図 3.12 に示す．カメラの撮影範囲は縦 14mm 横 14mm の正方形であり中心にノズルが位置している．赤線は，気泡の重心を画像処理似て求めそれを画像上にプロットしたものである．気泡の軌道は，発生から 14mm の区間では直線を描くように上昇することが確認できた．また図 3.13 に気泡の長軸 a ，短軸 b の時間変化を示す．時間は，初期気泡生成から 0.3s ほどの間で，長軸は $3\text{-}8\text{mm}$ まで短軸は $1.2\text{-}5.6\text{mm}$ まで形状変化する挙動が観察できた．また，気泡の平均等価直径を測ったところ 4.69mm であった．これにより，ノズル生成領域で初期気泡生成時には気泡の形状は大きく変化し，形状が安定しないことが確認できた．

また，前述の上下動システムを用いて，単一気泡の追従撮影を行い気泡の軌道及び形状変化を撮影した．試験条件は， 5mm のフィルターでろ過した水，空気を用いて行い，水温は 25°C で行った．なお，光源は LED バックライトを用いており気泡を高速度ビデオカメラで可視化観測することによって，気泡の軌道及び形状変化を観察した．また，ノズルは外径 5mm 内径 3mm のステンレス製である．

カメラの撮影範囲と，気泡の軌跡を図 3.14 に示す．カメラの撮影範囲は縦 14mm 横 14mm の正方形である．赤線は，気泡の重心を画像処理似て求めそれを画像上にプロットしたものである．気泡の軌跡は，画像中央でジグザグ運動をしており高さ方向へはさほど動かなかったことから，気泡の追従撮影が成功したと考えられる．この時，架台の上昇速度は 0.375m/s で上昇させており，動画で確認したところ気泡は画面中央にて定位置であったため，撮影中の気泡の上昇速度は，架台の上昇速度と等しいと考えられる．また，図 3.15 に気泡の長軸 a ，短軸 b の時間変化を示す．撮影時間は 0.7s 程であり，その間の気泡の長軸及び短軸の変化を図に示した．ノズルからの気泡生成時と比べ，気泡の形状変化は安定的であり長軸短軸共々，値が極端に上下することはなかった．また気泡の等価直径を測ったところ， 5.41mm であった．撮影を開始したのは，ノズルから高さ方向 800mm 程の所でありノズルから発生した気泡が上昇することによって，形状変化が安定することが分かった．

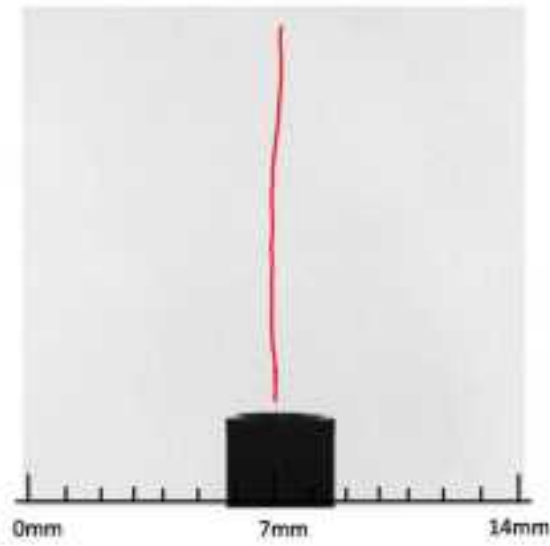


図 3.12 気泡の重心軌道

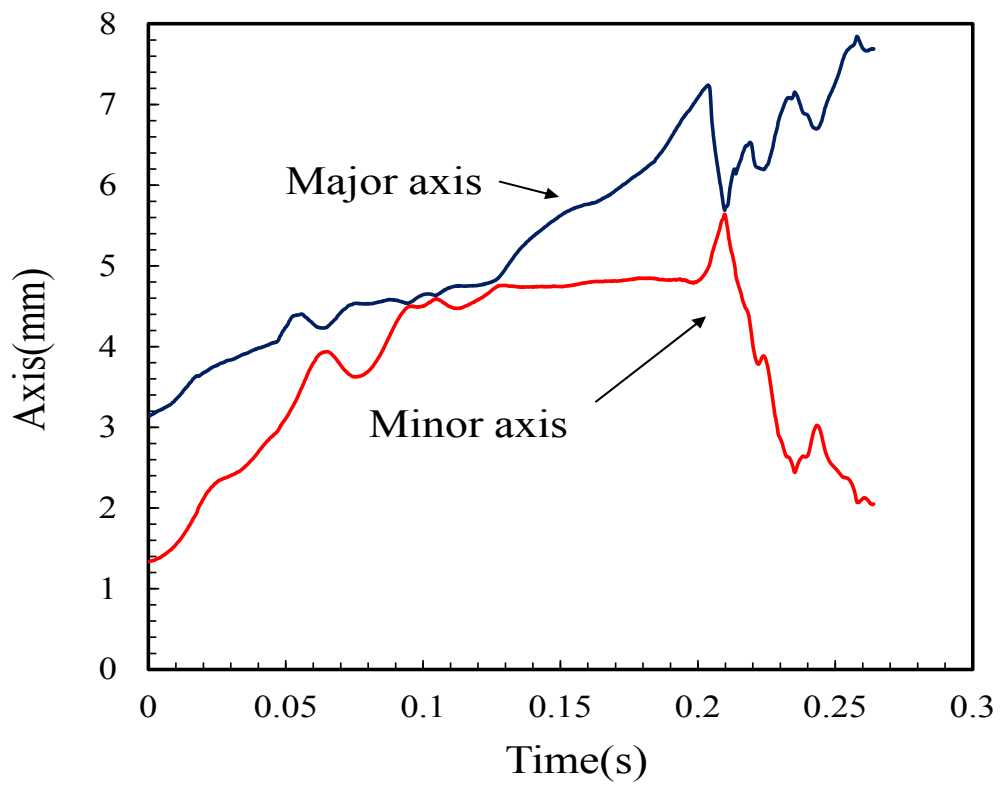


図 3.13 気泡の形状変化

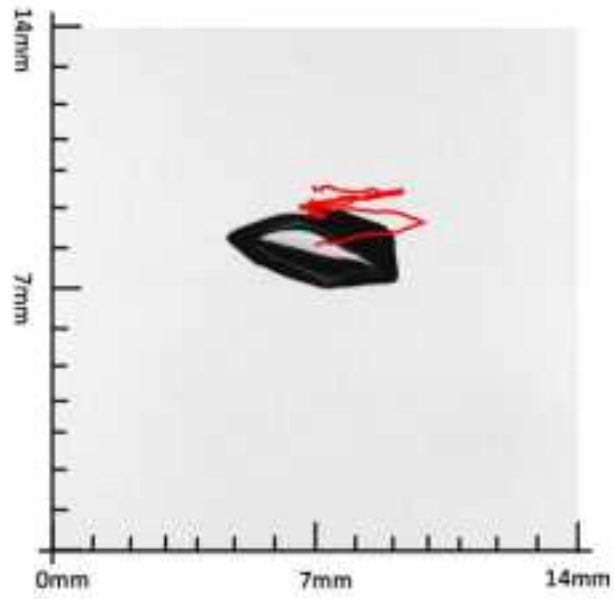


図 3.14 上昇気泡の軌跡

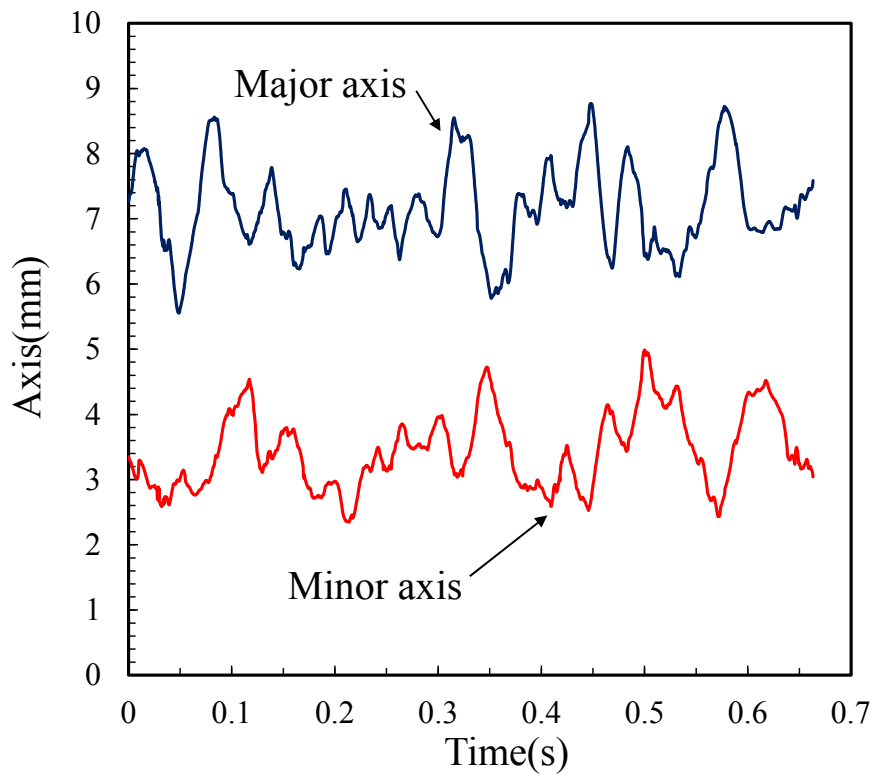


図 3.15 気泡の長軸及び短軸の時間変化

3.2.3.2 気泡及びエアロゾル粒子の速度分布

エアロゾル模擬粒子として、図 3.16 に示す粉末シリカ及び図 3.17 に示すエクспанセル粒子を用いて実験を行った。エアロゾル粒子の速度分布を計測する計測手法を開発するため、(a)気泡内粒子の PIV 計測法、(b)気泡内粒子の PTV 計測法と二種類の計測法で粒子の速度を取得した。以下に詳細と結果を示す。

(a) 気泡内粒子の PIV 計測法

大型試験装置を用いて実験を行い、高速度ビデオカメラを 2 台用いてステレオ撮影を行った。試験条件は、 $5\mu\text{m}$ のフィルターでろ過した水、空気を用いて行い、エアロゾル模擬粒子として、微粉末シリカ粒子を用いた、また水温は 25°C で行った。気泡生成ノズルは外径 5mm 内径 3mm のステンレス製である。なお、光源は 375w ファイバー照明 (フォトロン社製 PCS-MH375RC) を用いて撮影を行った。

図 3.18 にステレオ撮影方法を示す。図のようにテスト部に照射されたファイバーライトを挟み込むようにカメラを配置し、ステレオ撮影を行い三次元 PIV を行った。その際上記で行ったようにキャリブレーションシステムを用いてキャリブレーションを行い空間座標を取得した。ファイバーライトの直径は 30mm 程であり、レーザー光と比べると広範囲に光があたる。また、ファイバーライトの光は平行波であるため気泡界面にて散乱光が抑えられる。さらに、光量が強く粒子が顕著に光ることが確認できた。

図 3.19 に撮影画像を示す、画像から気泡内部に粒子が混入していることがわかる。ステレオ撮影では図の画像のように、左側のカメラと右側のカメラで同じ気泡を捉えなければならぬ、さらに、気泡内部の粒子の動きを三次元的に観察するためには、両サイドから見た気泡がどちらも内部が観察可能な状態でなければならず、そのため観察可能な時間はごくわずかなものとなる。今回の実験では、観測可能な時間は 0.09s 程であった。その間気泡は、カメラの撮影範囲に対して中央の位置に居続けなおかつ、内部の挙動が確認できる状態にあった。図では、気泡及び気泡内部の粒子の挙動の時間変化を $0-0.04\text{s}$ までの間の挙動を示す。ここで画像処理にて求めた気泡の等価直径は 6.4mm であった。図 3.20 に二台のカメラの合成画像を示す。図の速度ベクトル方向を見ると旋回挙動を示していることが分かった。また、図 3.21 に速度ベクトルを三次元空間座標用にて表した画像を示す。測定を通じて粒子の速度は、最高 0.3m/s 程であった。三次元 PIV では、断片的にベクトルの方向に連続性が見られた。また、図 3.22 にて、前述したステレオ PIV 処理のときに撮影した画像の速度を算出した結果を示す。計測時間は 0.086s の間で行い、横軸は時間、縦軸は粒子の速度を表す。気泡内の粒子の速度は $0\sim 0.4\text{m/s}$ の間で著しく変化する様子が伺えた。また、これによりすべての結果で粒子の速度は 0.01m/s 程を示し、オーダーで気泡内粒子を捉えていると考えられる。

微粉末シリカ粒子 SYLOPHOBIC 200



空気流れのPIVにも用いられる物質

特徴:

- 高い比表面積
- コントロールされた粒子系/粒度分布
- 優れた分散性
- 高い吸油量
- 優れた疎水性

外観⇒流動性白色粉末

平均粒子径⇒ $3.79 \mu\text{m}$

白色度⇒98.9

見かけの密度(緩め) 90 kg/m^3

見かけの密度(固め) 150 kg/m^3

図 3.16 微粉末シリカ粒子の仕様

疎水性 エクспанセル

外観⇒白色粉末

平均粒子径⇒ $40 [\mu\text{m}]$

材質⇒アクリルニトリル

密度 ⇒ $30[\text{kg/m}^3]$



図 3.17 エクспанセル粒子の仕様

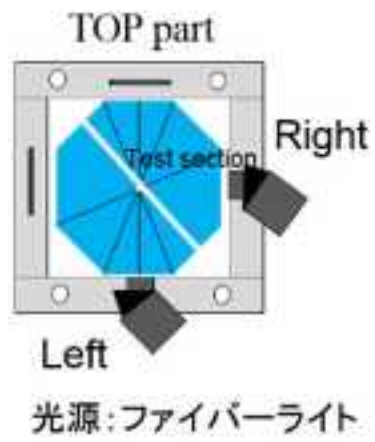


図 3.18 ステレオ撮影体系

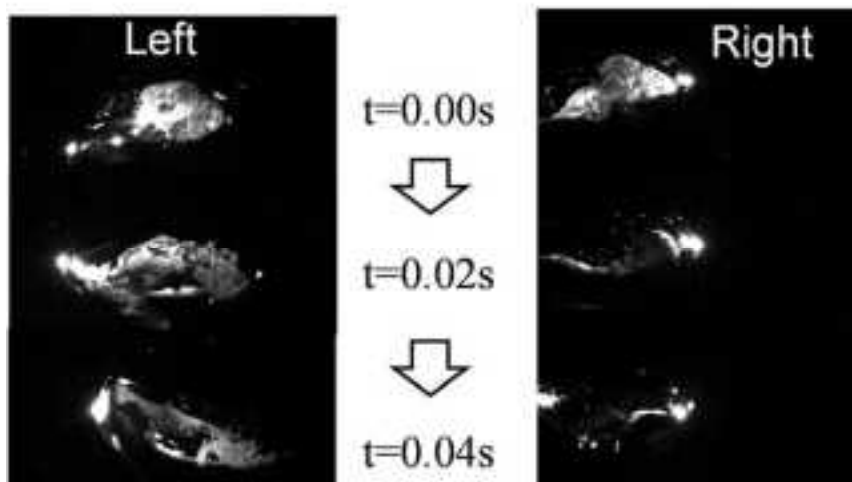


図 3.19 上昇気泡位置の比較

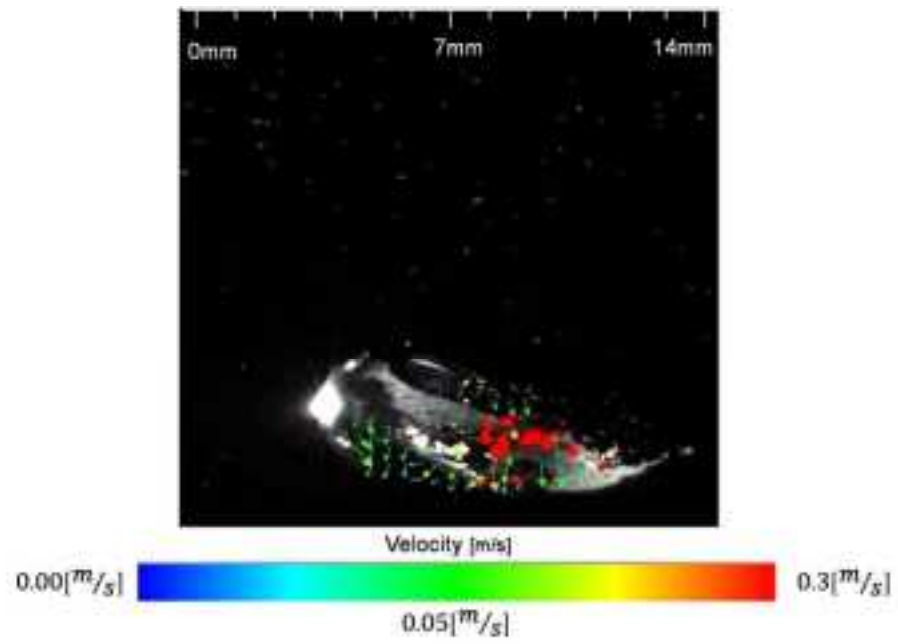


図 3.20 気泡内粒子の速度ベクトル

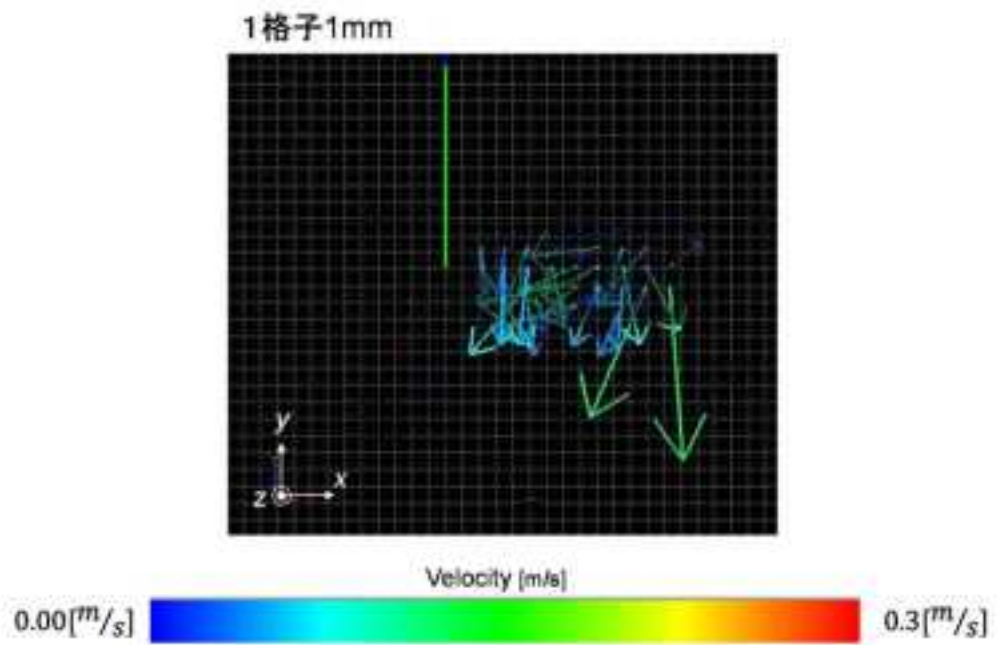


図 3.21 気泡内粒子速度の三次元可視化

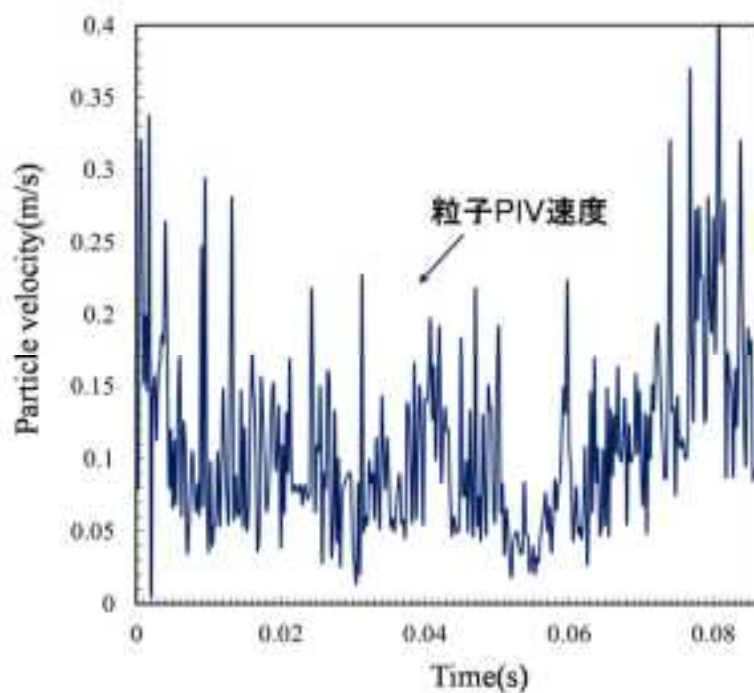


図 3.22 ステレオ PIV にて求めた粒子速度

(b) 気泡内粒子の PTV 計測法

データの妥当性を確認するため、図 3.23 に示すように粒子速度の実測を行った。実測方法は 0.01s 毎の画像より、内部の粒子を 1 つ追跡し座標の移動距離を時間で除して粒子瞬時速度を算出した。図 3.24 に PIV 処理にて計測を行った粒子速度と、実測にて算出した粒子速度との比較を行った結果を示す。計測時間は 0.05s の間で行い、横軸は時間、縦軸は粒子の速度を表す。図中の赤線が PIV 処理にて求めた速度を示し、黒点が実測値を表している。両方を比較した結果、粒子の速度の変動は -0.01~0.5m/s の範囲内で収まり同オーダーであることを確認した。

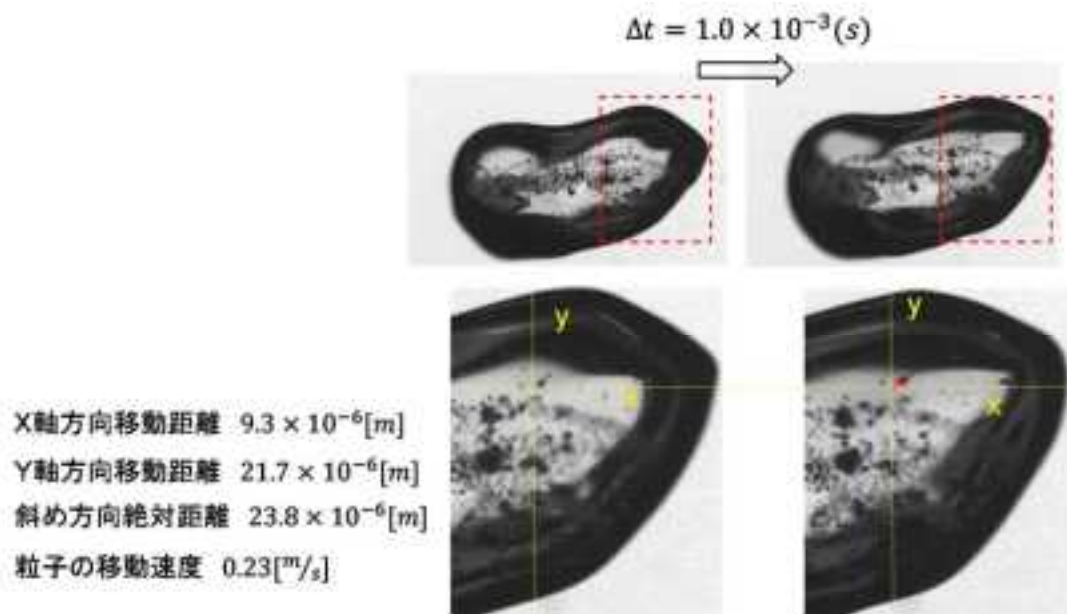


図 3.23 気泡内粒子速度の実測

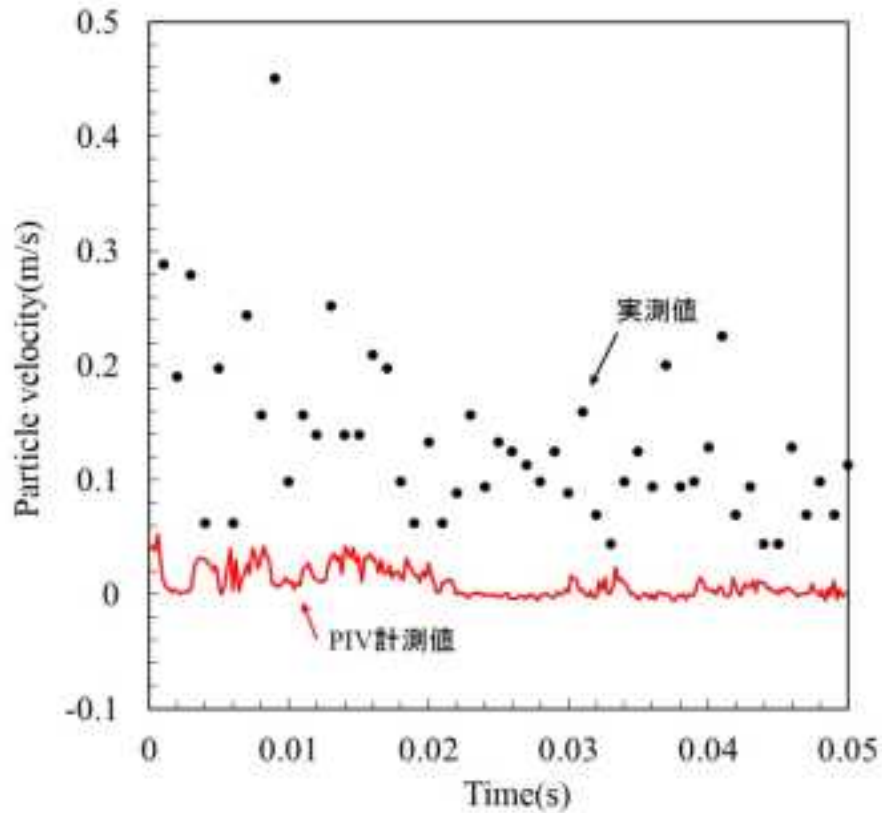


図 3.24 PIV と実測にて求めた粒子速度の比較

3.2.3.3 エアロゾル濃度及びその変化（気泡内外）

エアロゾル濃度においては要開発項目とする。現段階では LIF 計測法を用いての計測可能性を検討している。LIF 計測とは、流体に混入された物質が温度や濃度に依存した明るさや色を示し、それらを画像として捉えることで温度や濃度の分布を計測することができる計測法である。また、他にも水に触れることで色が変化する薬品によりエアロゾル粒子を模擬することで、エアロゾルの水中への溶解に伴う気泡周りの色調変化を撮影し、画像処理により濃度を求める方法やホログラフィー計測によってエアロゾルの溶解により気泡周囲に生じる濃度差を、干渉縞として撮影して、画像処理により求める方法など多方面から検討している。

3.2.3.4 気相体積

前述した上下動システムを用いて気泡の追従撮影を行い、上昇気泡の体積を取得するため画像処理を実施した。まず気泡の長軸 a 、短軸 b 、を時間系列で計測するため画像処理を行った。画像処理方法では図 3.25 に示すように、元画像を二値化し気泡の輪郭を検出した後、輪郭の座標を取得し時間ごとの気泡の長軸 a 、短軸 b を取得した。これにより、気泡を楕円近似として以下の式を用いて気泡体積を算出した。

$$v_b = \frac{4}{3} \pi a^2 b \quad (3.2.1)$$

上記の式を用いて、楕円の体積を求め上昇気泡の体積変化を図 3.26 に示す。図より平均気泡体積を求めると $1.43 \times 10^{-7}(\text{m}^3)$ となり、これにより上昇気泡の気相体積の計測が可能となった。



図 3.25 気泡界面の画像処理計測

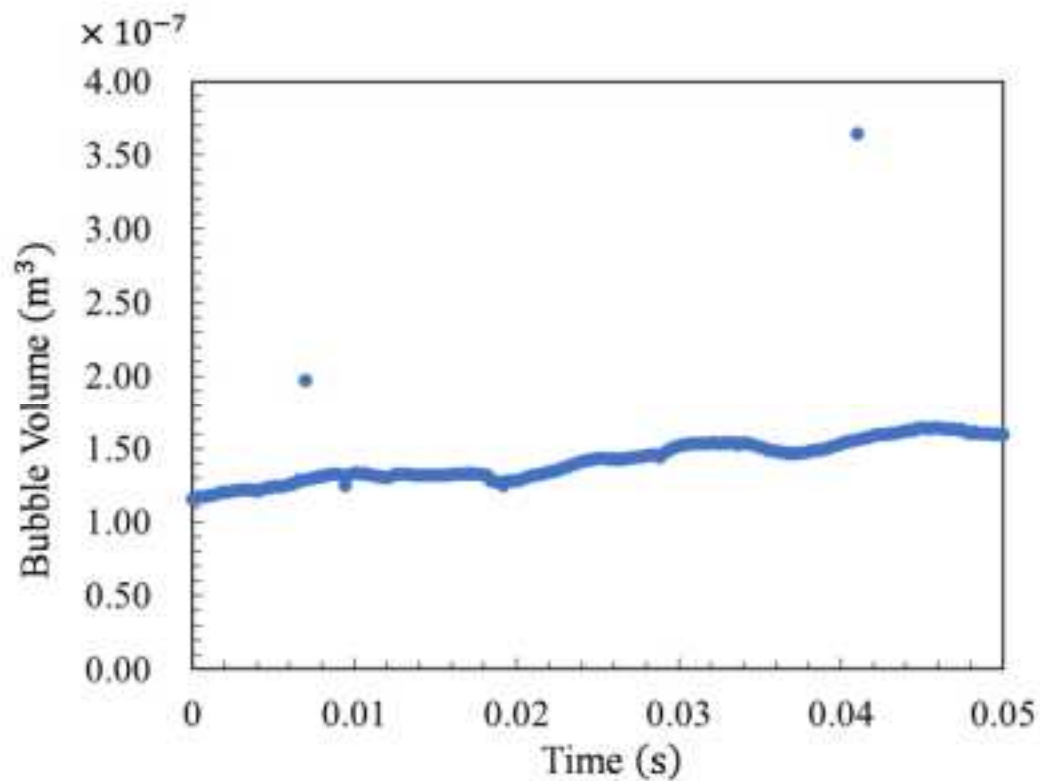


図 3.26 上昇気泡の体積変動

3.2.3.5 液温及び気相温度（試験装置内で複数点，大まかな空間分布）液相内で温度成層化を形成させる場合は，高さ方向の液温温度分布（詳細分布）

試験容器内に熱電対を設置し液温を測る．気相温度はサーモグラフィを用いて測る．液相内で温度成層化を形成させる場合には，図 3-27 に示すように，高さ方向の液温温度分布が必要であるため長さの異なる熱電対を試験部容器蓋より内部へ吊り下げ，水試験部容器内液温分布を測定する．なお，試験部容器内の蓋には全部で八カ所熱電対を設置可能である．

3.2.4 実験データの整理

スクラビング解析モデルの高度化又は妥当性確認への実験データの活用を念頭に置き、取得データから、二相流動とエアロゾル挙動に関する各種パラメータのエアロゾル除去効果への影響を整理し、貸与した解析コード中の物理モデルなどを念頭に、スクラビングにおけるエアロゾル除去効果に大きく影響するパラメータを明らかにする。また、過去文献等との実験結果の比較を行い、実験データの検証を行う。

3.2.4.6 スウーム上昇領域中のエアロゾル粒子の速度比較

MELCOR コード内において、スウーム上昇領域中の気泡内のエアロゾル粒子の速度を表す表記が見られたため実験データとの比較を行った。式(3.2.2)に全体の DF を示す。

$$DF_{OV,i} = DF_{EC} \times DF_{II,i} \times DF_{ER,i} \times DF_{SR,i} \quad (3.2.2)$$

ここで全体の除染係数を表す $DF_{OV,i}$ 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 $DF_{ER,i}$ 、スウーム流上昇領域における遠心拡散およびブラウン拡散による $DF_{SR,i}$ の商によって求められる。さらに、スウーム流上昇領域における遠心拡散およびブラウン拡散による $DF_{SR,i}$ を表す式を(3.2.3)に示す。

$$DF_{SR,i} = \frac{1}{f_{gl} + \frac{(1-f_{gl})}{DF_{BB,i}}} \quad (3.2.3)$$

ここで $DF_{BB,i}$ は気泡内での除去要因を表し、 f_{gl} は初期グローブユール内の気相割合を表す。次に式(3.2.4)に $DF_{BB,i}$ を示す。

$$DF_{BB,i} = \exp\left[\frac{\Delta t}{v_b} \int_{A_{surf}} V_{n,i} dA\right] \quad (3.2.4)$$

$DF_{BB,i}$ は、気泡体積 v_b 、気泡の表面積 A_{surf} 、気泡界面に向かう粒子の速度 $V_{n,i}$ で構成されており、式の中で気泡界面に向かう粒子の速度 $V_{n,i}$ の表記があったためこの式の値と、実験によって取得した粒子の速度を比較する。(3.2.5)に気泡界面に向かう粒子の速度 $V_{n,i}$ について示す。

$$V_{n,i} = V_{c,i} + V_{D,i} - V_{g,i} \cos \beta - V_v \quad (3.2.5)$$

気泡界面に向かう粒子の速度 $V_{n,i}$ は、遠心力の効果 $V_{c,i}$ 、ブラウン拡散の効果 $V_{D,i}$ 、沈降速度の効果 $V_{g,i} \cos \beta$ 、蒸発・凝縮による界面蒸気フラックス V_v で評価されており、本実験では蒸気を混入していないため、粒子の速度を求めるうえでブラウン拡散の効果と蒸発・凝縮による界面蒸気フラックスは無視し計算を行った。次に、遠心力の効果 $V_{c,i}$ を表す式(3.2.6)を示す。

$$V_{c,i} = V_{g,i} \left(\frac{V_s^2 / r_c}{g} \right) \quad (3.2.6)$$

遠心力の効果 $V_{c,i}$ 中には気泡の曲率半径 r_c 、気泡の表面速度を表す V_s 、重力加速度 g が考慮されている。式(3.2.7)にて気泡の曲率半径 r_c について示す。

$$r_c = \frac{1}{ab} \left[\frac{a^4 \cos^2 \theta + b^4 \sin^2 \theta}{a^2 \cos^2 \theta + b^2 \sin^2 \theta} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (3.2.7)$$

気泡の曲率半径 r_c は、図 3.28 にもあるように気泡の長軸 a 、短軸 b 、気泡の中心から粒子までの角度 θ より構成されている。また式(3.2.7)にて気泡の表面速度を表す V_s について説明する。

$$V_s = \frac{-V_r \left(\frac{r \sin \theta}{a} \right)}{\left[\left(\frac{r \cos \theta}{b} \right)^2 + \sinh^2 \xi_o \right]^{\frac{1}{2}} \left[\sinh \xi - \cosh^2 \xi_o \cot^{-1}(\sinh \xi_o) \right]} \quad (3.2.7)$$

気泡の表面速度を表す V_s は気泡の上昇速度を表す V_r と式(3.2.8)に示す要素で構成される。

$$\begin{aligned} \sinh \xi_o &= \left[\left(\frac{a}{b} \right)^2 - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \\ \cosh \xi_o &= \left[1 - \left(\frac{b}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ r &= \left[\left(\frac{\sin \theta}{a} \right)^2 + \left(\frac{\cos \theta}{b} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (0 \leq \theta \leq \pi) \end{aligned} \quad (3.2.8)$$

また、沈降速度の効果 $V_{g,i} \cos \beta$ を式(3.2.9)に示す。

$$V_{g,i} = \frac{\rho_l g S_i d_i^2}{18\mu} \quad (d_i \leq 70 \mu m) \quad (3.2.10)$$

沈降速度の効果 $V_{g,i}$ は、水の粘性係数 μ 、微粒子密度 ρ_l 、気泡の表面積 S_i 、微粒子径 d_i から構成されている。 $\cos \beta$ 中の β については式(3.2.11)に示す。

$$\beta = \tan^{-1} \left[\frac{b^2 \tan \theta}{a^2} \right] \quad (3.2.11)$$

β 中には、気泡の長軸 a 、短軸 b 、気泡の中心から粒子までの角度 θ が考慮されている。

以上の式を用いて、気泡内の粒子速度を試算した。まず気泡の長軸 a 、短軸 b 、を時間系列で計測するため、図 3.29 に示す画像処理を行った。画像処理では元画像を二値化し気泡の輪郭を検出した後、輪郭の座標を取得し時間ごとの気泡の長軸 a 、短軸 b を取得した。さらに、気泡の中心から粒子までの角度 θ では、図 3.30 に示すように、撮影した画像の測定した粒子ごとに中心からの角度を求めた。また、上昇速度を表す V_r は気泡の追従ができていないと考え、架台の上昇速度を入力し試算を行った。試算した結果を図 3.31 に示す。図中の赤線が PIV 計測によって取得した気泡内粒子の速度情報を示し、黒点を実測によって取得した速度情報を示す。試算によって得られた値は青線で示されている。図を見ると、既存コード内で

使われている粒子の速度の計算式によって求めた気泡内の粒子の速度と、可視化実験によって求めた粒子の速度とはおおよそ一桁あまりのオーダーの違いが見られた。また図 3.32 に気泡の表面速度を加味した図を示す。図中の赤線が PIV 計測によって取得した気泡内粒子の速度情報を示し、黄線が気泡の表面速度を示す。また黒点が実測によって取得した速度情報を示す。この結果から、測定した粒子の速度は、気泡内の粒子の速度よりも気泡の表面速度に速度のオーダーが近いことが分かった。これは実測時に気泡内内側の界面に付着した粒子を測定していることが要因の一つだと考えられる。

また、実測を行う際気泡内粒子の軌跡を計測した。図 3.33 に上昇気泡内粒子の軌跡を示す。計測を行う際、一つの粒子を追従し続ける場合途中で粒子群に紛れたり、界面に付着して計測ができなくなった場合があるため、その都度計測する粒子の種類を変更し合計で 7 種類の粒子を計測した。平均速度を求めると、粒子の速度は気泡中心の方が、界面付近の粒子の速度よりやや早いことが分かった。

MELCOR コード内の、粒子の速度を表すモデル式の内容の確認のため、長軸 a 及び短軸 b を固定し、気泡の中心から粒子までの角度を表す θ についての感度計算を行った。図 3.34 では、横軸を θ として β の感度計算を行った。図 3.35 では、横軸を θ として $\cos \beta$ の感度計算を行った。図 3.36 では、横軸を θ として r の感度計算を行った。図 3.37 では、横軸を θ として表面速度を表す V_s の感度計算を行った。図 3.38 では、横軸を θ として r_c の感度計算を行った。図 3.39 では、横軸を θ として V_{ci} の感度計算を行った。図 3.40 では、これまで算出した数値を受け、横軸を θ として気泡内粒子速度を表す V_n の感度計算を行った。いずれも θ の範囲は $0 \sim 180^\circ$ までのパラメータを振って行っており、長軸 a は $0.046(m)$ 、短軸 b は $0.0027(m)$ で固定し計算を行った。

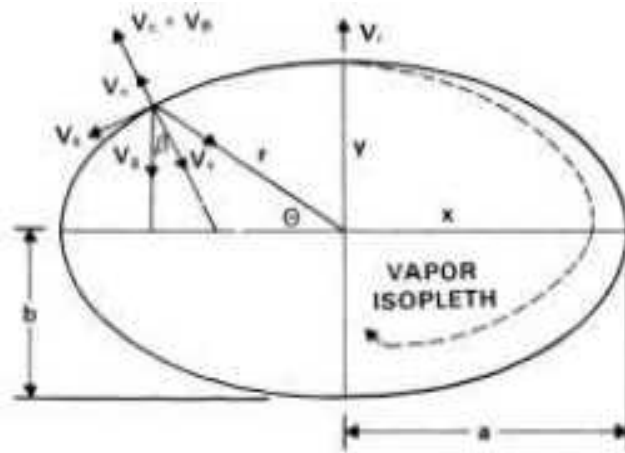


図 3.28 SPARC-90 における気泡モデル



図 3.29 気泡界面の画像処理計測

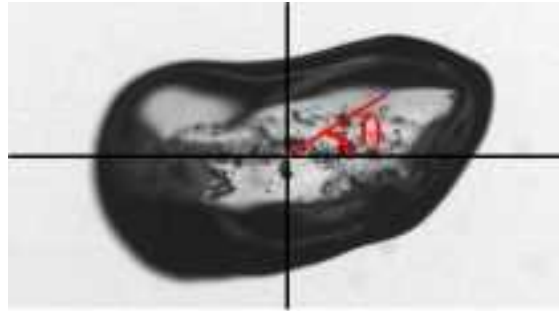


図 3.30 気泡の中心から粒子までの角度

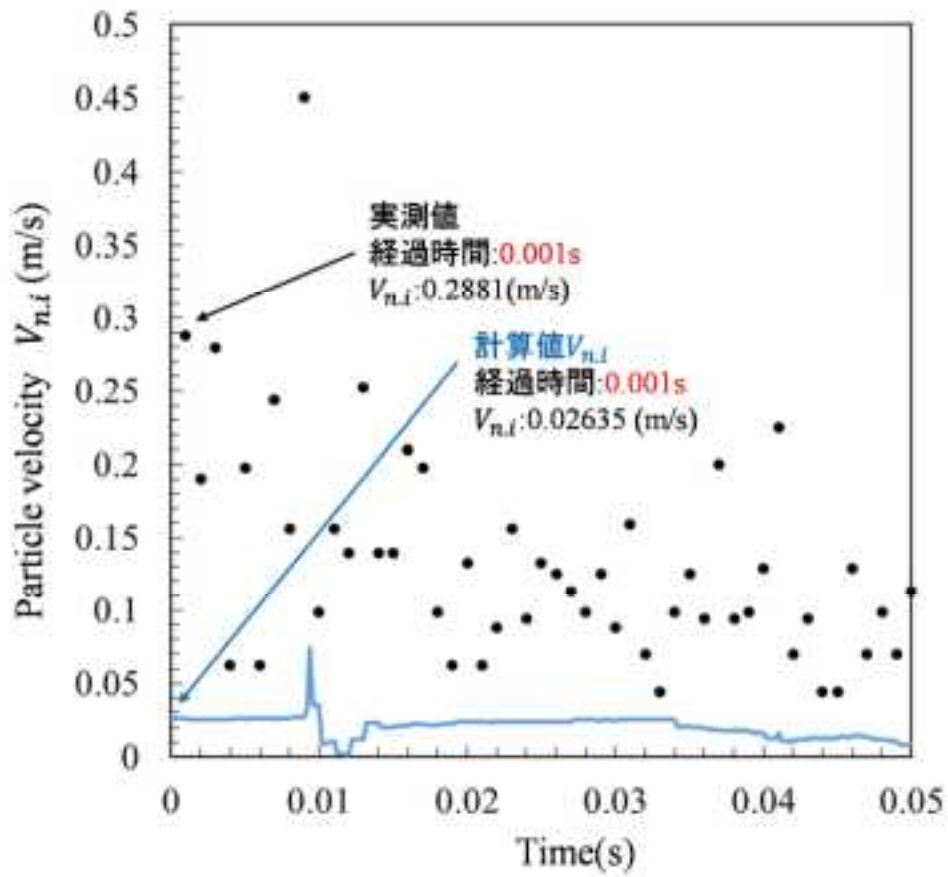


図 3.31 上昇気泡内粒子の二次元 PTV との速度比較

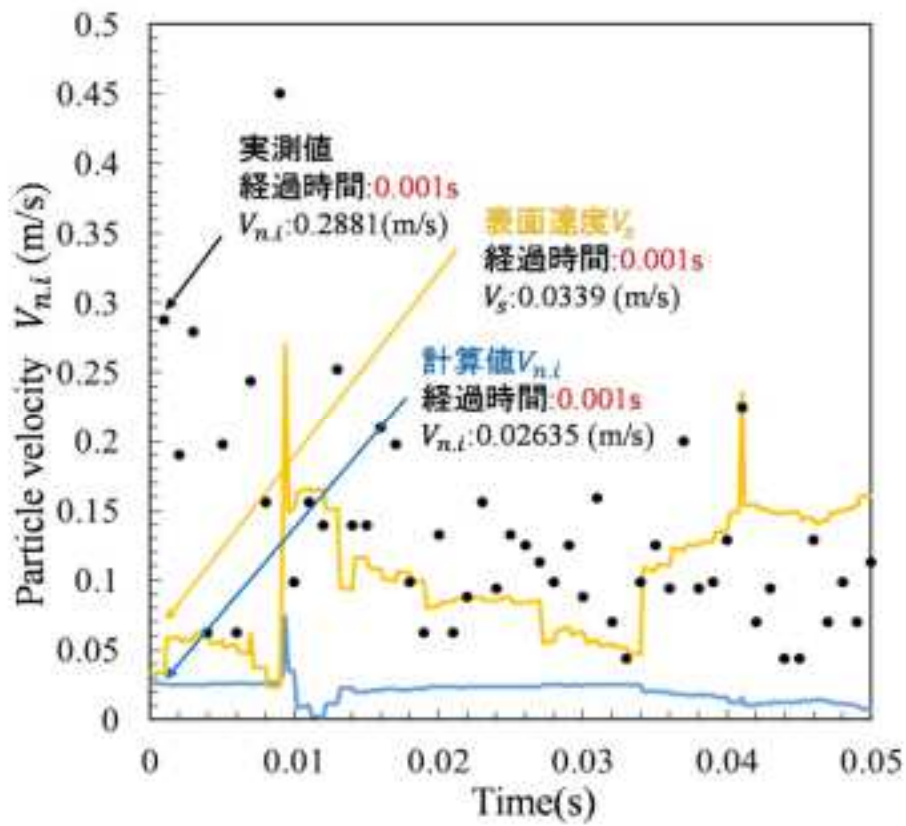


図 3.32 気泡の表面速度との比較

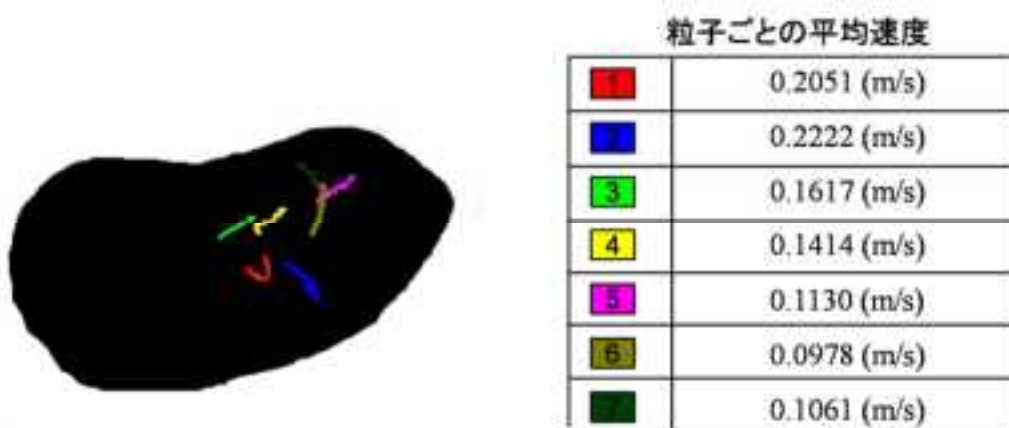


図 3.33 気泡内粒子の軌跡

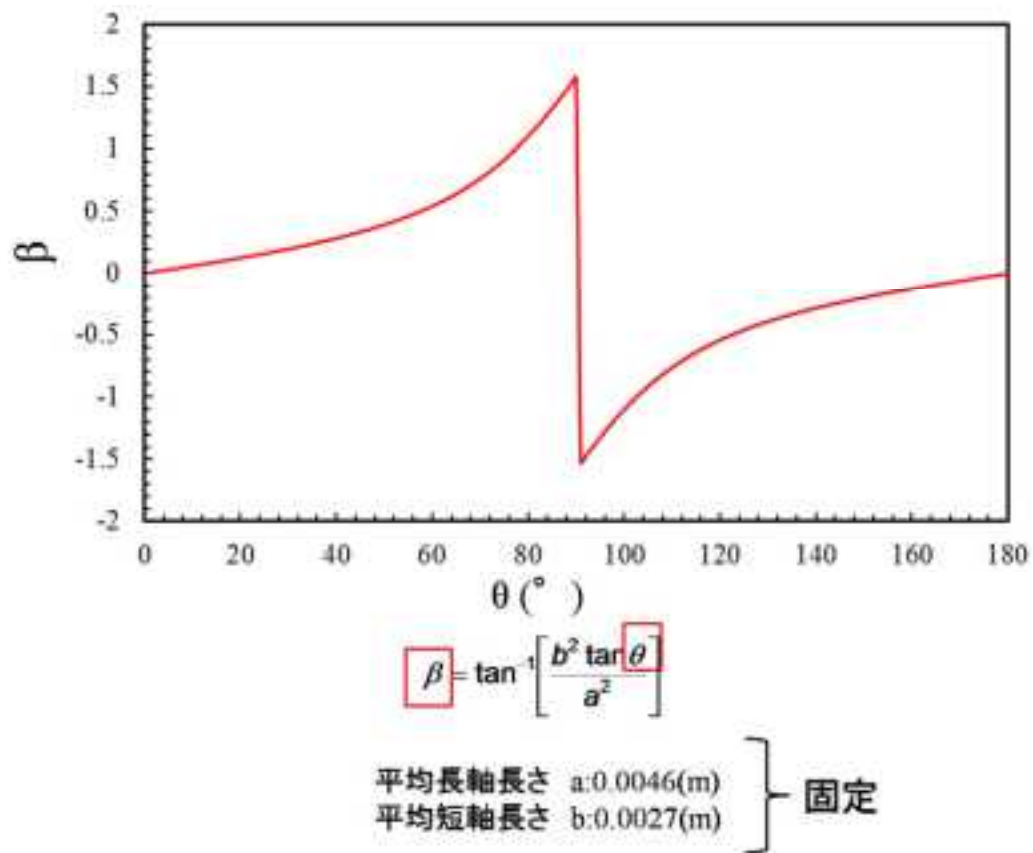


図 3.34 気泡中の粒子の角度と β の変化

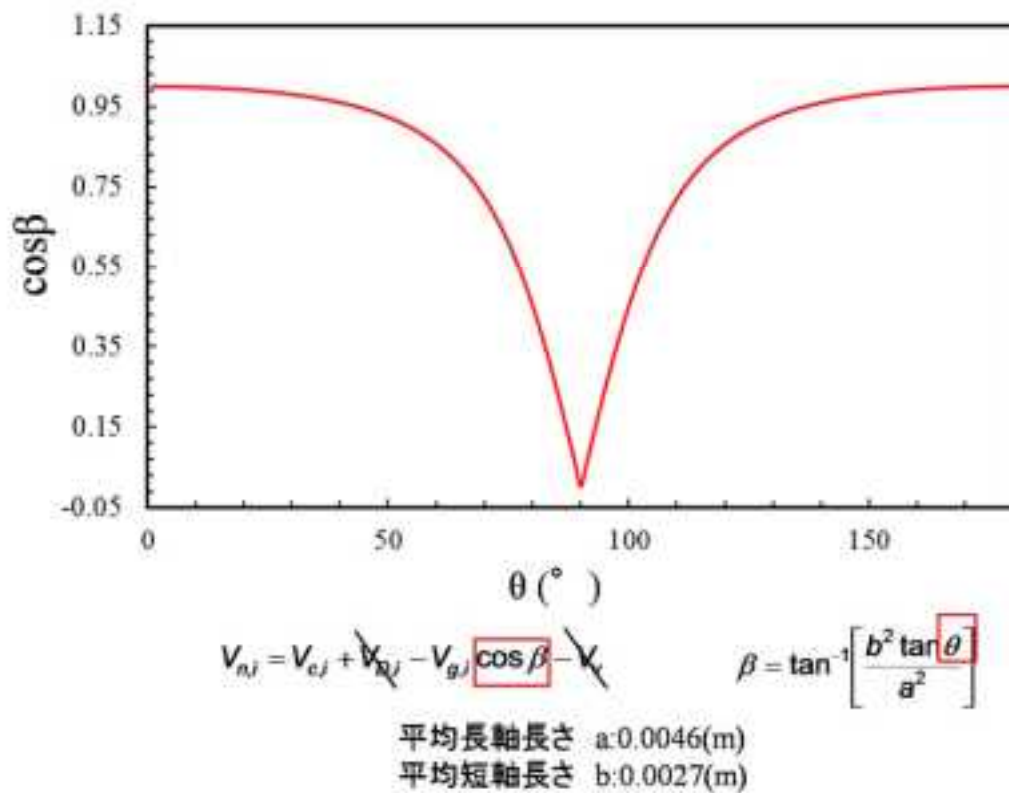
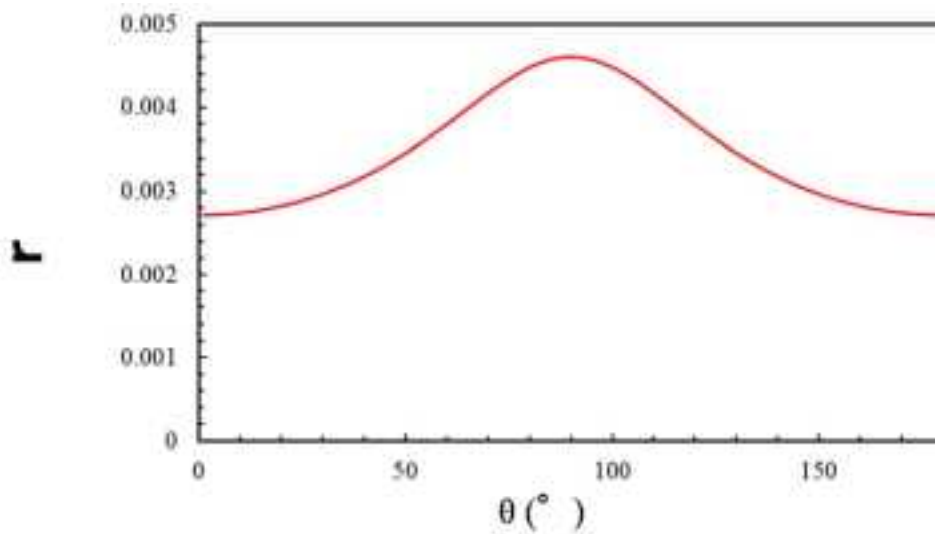


図 3.35 気泡中の粒子の角度と $\cos\beta$ の変化

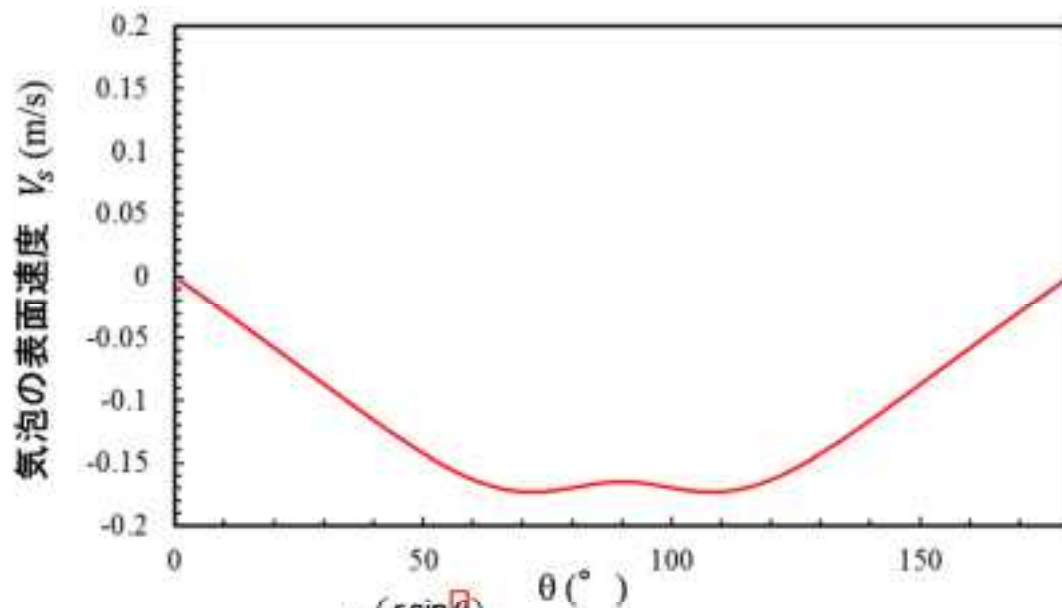


$$r = \left[\left(\frac{\sin \theta}{a} \right)^2 + \left(\frac{\cos \theta}{b} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (\text{radical coordinate})$$

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

平均長軸長さ a:0.0046(m)
平均短軸長さ b:0.0027(m)

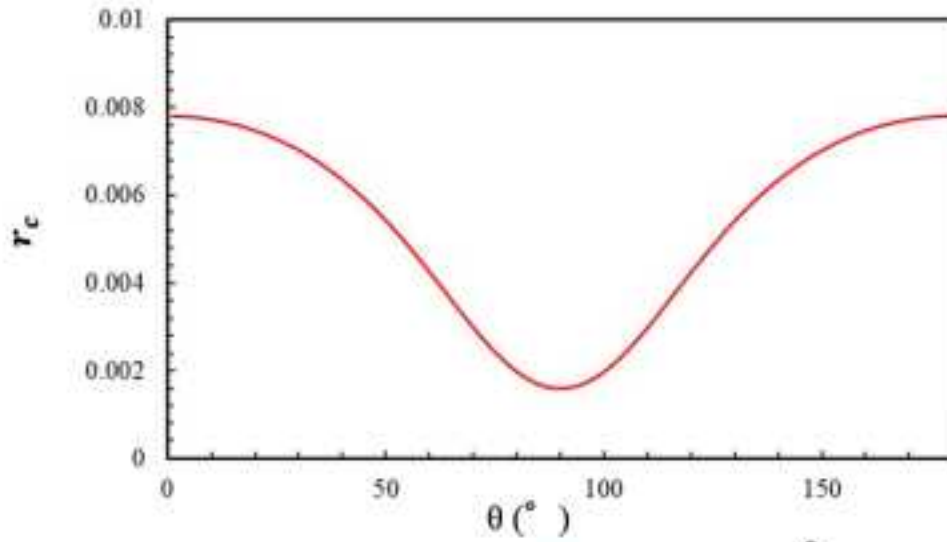
図 3.36 気泡中の粒子の角度と r の変化



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

平均長軸長さ a:0.0046(m)
 平均短軸長さ b:0.0027(m)

図 3.37 気泡中の粒子の角度と V_s

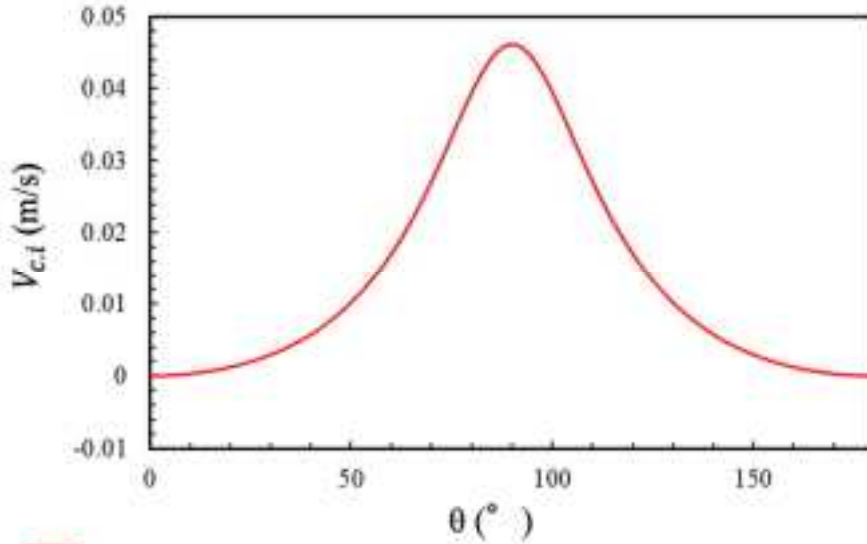


$$r_c = \frac{1}{ab} \left[\frac{a^4 \cos^2 \theta + b^4 \sin^2 \theta}{a^2 \cos^2 \theta + b^2 \sin^2 \theta} \right]^{\frac{3}{2}}$$

平均長軸長さ a:0.0046(m)

平均短軸長さ b:0.0027(m)

図 3.38 気泡中の粒子の角度と r_c の変化



$$V_{n,i} = V_{c,i} + \dot{X}_{\alpha,i} - V_{g,i} \cos \beta - \dot{X}_k \quad V_{g,i} = \frac{\rho_l g S_i d_i^2}{18\mu} \quad (d_i \leq 70 \mu\text{m}) \quad V_{c,i} = V_{g,i} \left(\frac{V_a^2}{g} \right)$$

$$V_e = \frac{-V_r \left(\frac{r \sin \theta}{a} \right)}{\left[\left(\frac{r \cos \theta}{b} \right)^2 + \sinh^2 \zeta_w \right]^{\frac{1}{2}}} \frac{1}{\left[\sinh \zeta - \cosh^2 \zeta_w \cot^{-1}(\sinh \zeta_w) \right]}$$

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

平均長軸長さ a:0.0046(m)
平均短軸長さ b:0.0027(m)

図 3.39 気泡中の粒子の角度と $V_{c,i}$ の変化

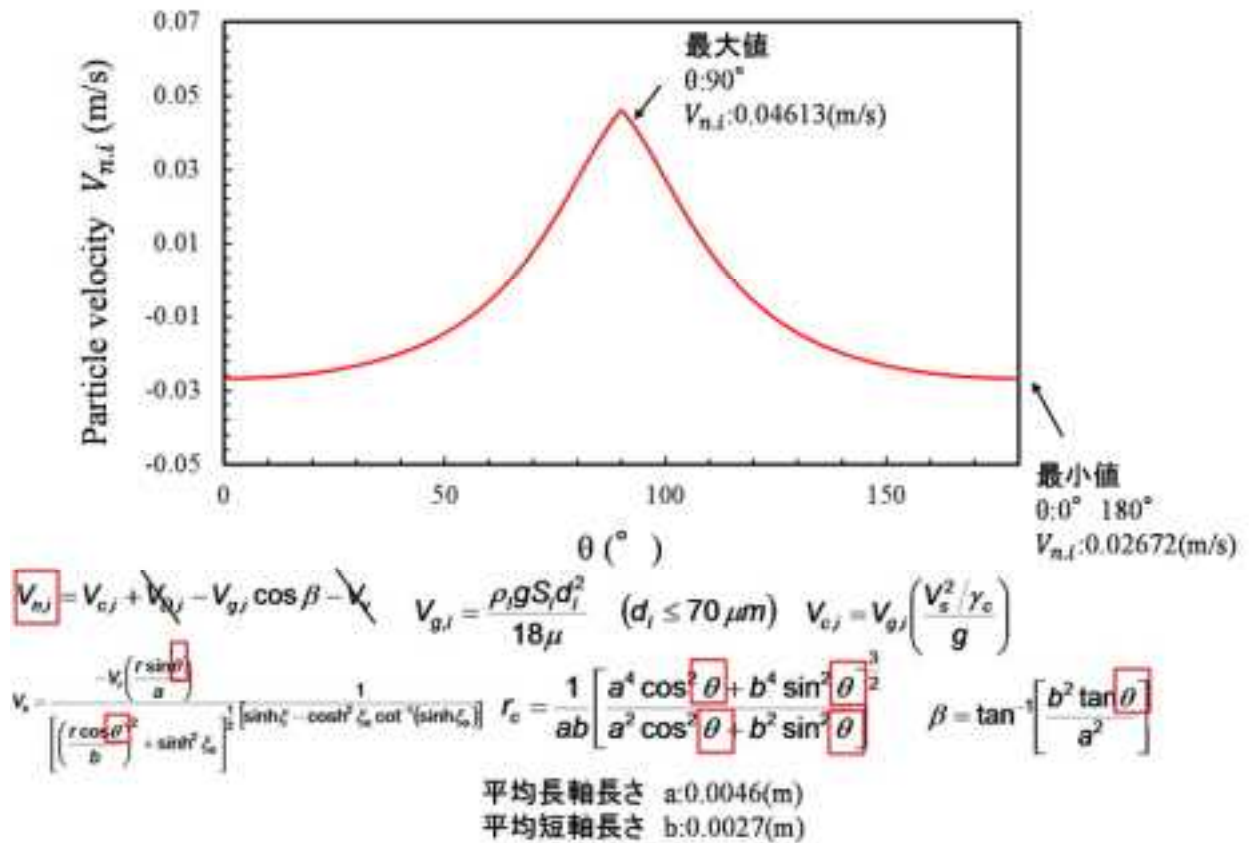


図 3.40 気泡中の粒子の角度と粒子の速度 $V_{n,i}$ の変化

3.2.4.7 粒子径が及ぼす気泡内粒子速度への影響

これまで実験にて用いた微粉末シリカ粒子と比較を行うために、粒子径や比重が異なるエクспанセル粒子を用いて実験を行った結果を示す。エクспанセル粒子の仕様を図 3.41 に示す。エクспанセル粒子の特徴としては、微粉末シリカ粒子と比較して質量が軽く、空気に対する比重が軽いことがあげられる。さらに粒子径も微粉末シリカ粒子に比べ大きい。図 3.42 にエクспанセル粒子を用いて撮影した可視化画像を示す。光源はファイバーライトを用いて計測を行った。粒子を含んだ気泡を発生させ、前述と同様の方法で気泡内の粒子の速度を測定した。今回の計測では、計測時間中三種類の粒子の速度と軌跡を追った。図 3.43 に軌跡を画像上にプロットした結果を示す。計測を行った三種類の粒子を赤線、青線、緑線で示した。図を見るとどの軌跡も気泡内を大きくは移動しておらず、計測時間中では移動座標の大きな変動は見られなかった。また、この時測定した粒子の速度を図 3.44 に示す。縦軸は粒子の速度、横軸は経過時間を示す。速度の実測は、0.001s 毎に実験にて得られた画像より計測した。気泡に含まれる粒子の速度は、どれも 0.05~0.15(m/s)のオーダーを示した。計測を行った粒子はそれぞれ軌跡の色と合わせて表示している。これにより三種類の粒子すべて

が同オーダーの速度を示したため、気泡内の粒子速度が $0.05\sim 0.15(\text{m/s})$ であると考えられる。

また、前述にもあったように既存コード内の計算式と比較を行うため、光源をファイバーライトと LED ライトとし、気泡の界面情報にも着目した実験を行い気泡の界面情報と、気泡内の粒子の速度情報の計測を同時に行った。図 3.45 に粒子の軌跡を示す。先ほどと同様に 3 種類の粒子を計測しており、それぞれ赤、青、緑といった線で軌跡を表している。また、画像上には紫の線で気泡の近似楕円を表している。図 3.46 に測定した粒子の速度を示す。縦軸は粒子の速度、横軸は経過時間を示す。速度の実測は、 0.001s 毎に実験にて得られた画像より計測した。気泡に含まれる粒子の速度は、どれも $0.05\sim 0.5(\text{m/s})$ のオーダーを示した。計測を行った粒子はそれぞれ軌跡の色と合わせて表示している。また、先ほどと同様に得られた実験データより計測した赤の粒子の速度（実測値）と MELCOR コードより求めた粒子の速度（計算値）を比較した結果を図 3.47 に示す。これにより、およそ一桁程のオーダーの違いが見られた。図 3.48 に気泡の表面速度との比較を行った結果を示す。これによると実測値には、気泡の表面速度を計算した結果の方が近い値を示すことが分かった。図 3.49 及び図 3.50 には青の粒子の比較を行った結果を示す。こちらも赤の粒子の測定結果と同様におよそ一桁のオーダーの違いが見られ、気泡の表面速度と実測での粒子速度が近い値となった。同様に図 3.51 及び図 3.52 に緑の粒子の比較を行った結果を示す。こちらも赤及び青の粒子の測定結果と異なり、計算による気泡の表面速度は計算による粒子の速度と近い値となった。最後に図 3.53 に粒子径と粒子速度を比較した結果を示す。この図には粒子径ごとの気泡内での実測による平均粒子速度をプロットしており、先ほど計測を行った微粉末シリカ粒子とエクспанセル粒子との比較を行っている。おのおのの粒子が、同オーダーの値を示したため、粒子径が気泡内粒子速度に及ぼす影響が微小なものだと考えられる。

疎水性 エクспанセル
外観⇒白色粉末
平均粒子径⇒40 [μm]
材質⇒アクリルニトリル
密度 ⇒ 30[kg/m³]



図 3.41 エクспанセル粒子の仕様

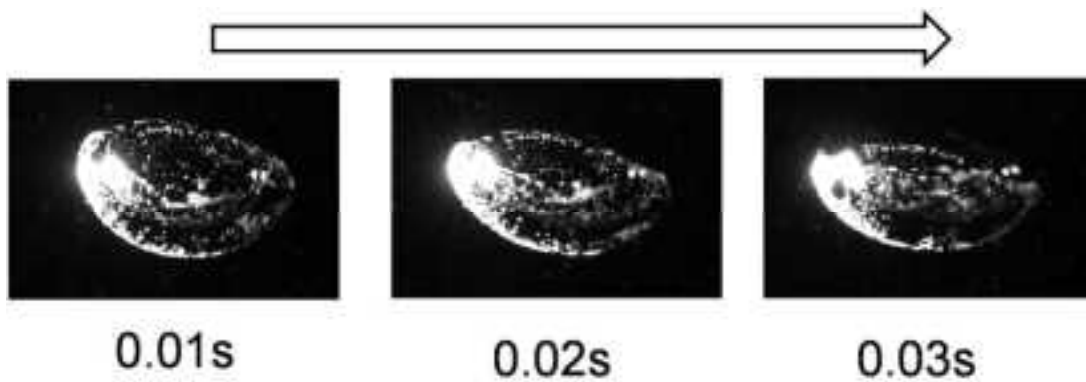


図 3.42 エクспанセル粒子の可視化

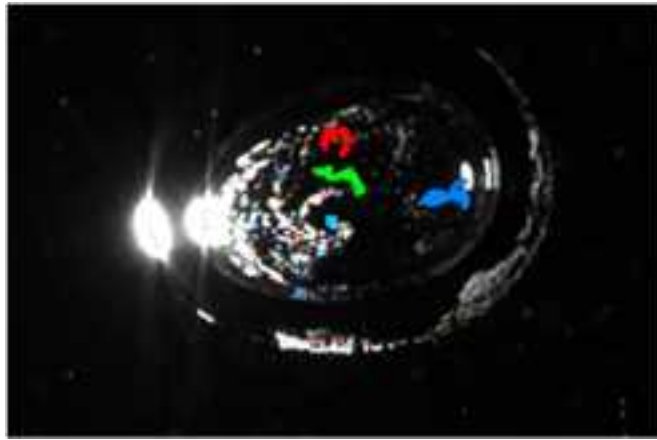


図 3.43 エクспанセル粒子の軌跡

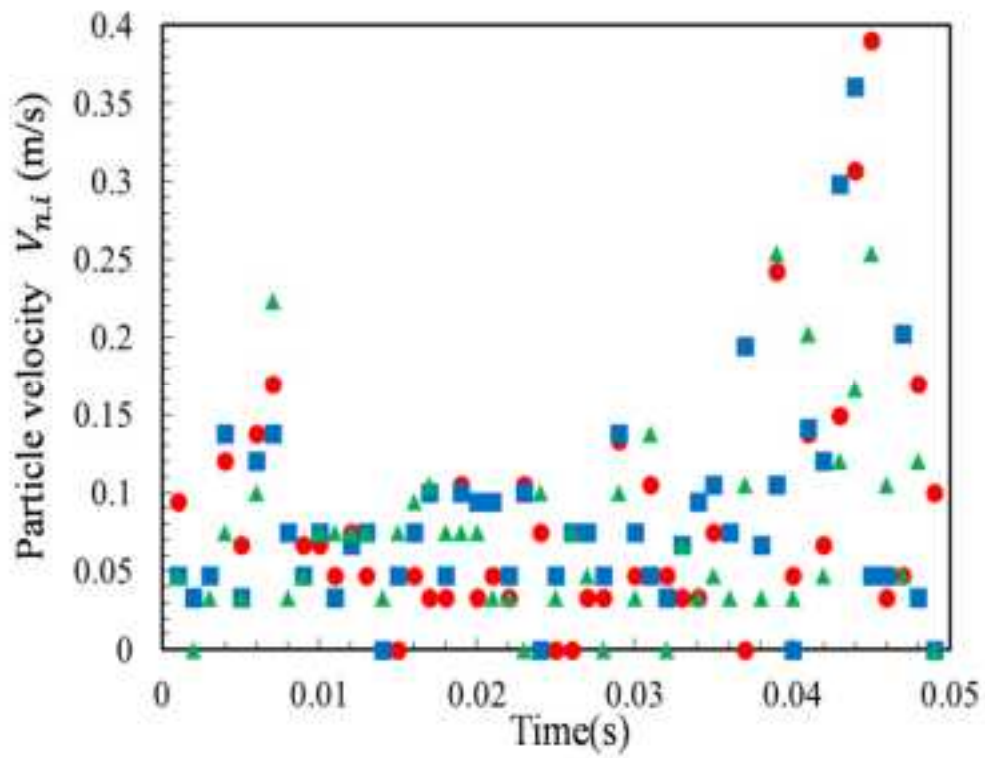


図 3.44 気泡内粒子の速度

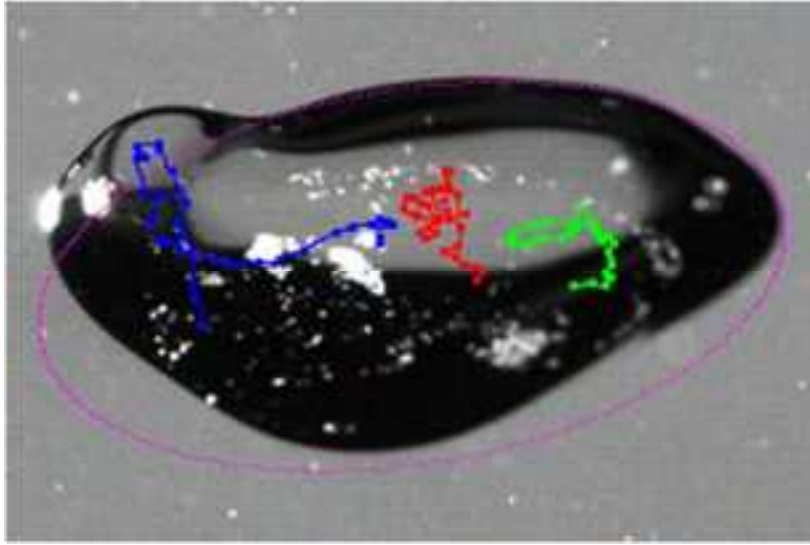


図 3.45 気泡内粒子の軌跡

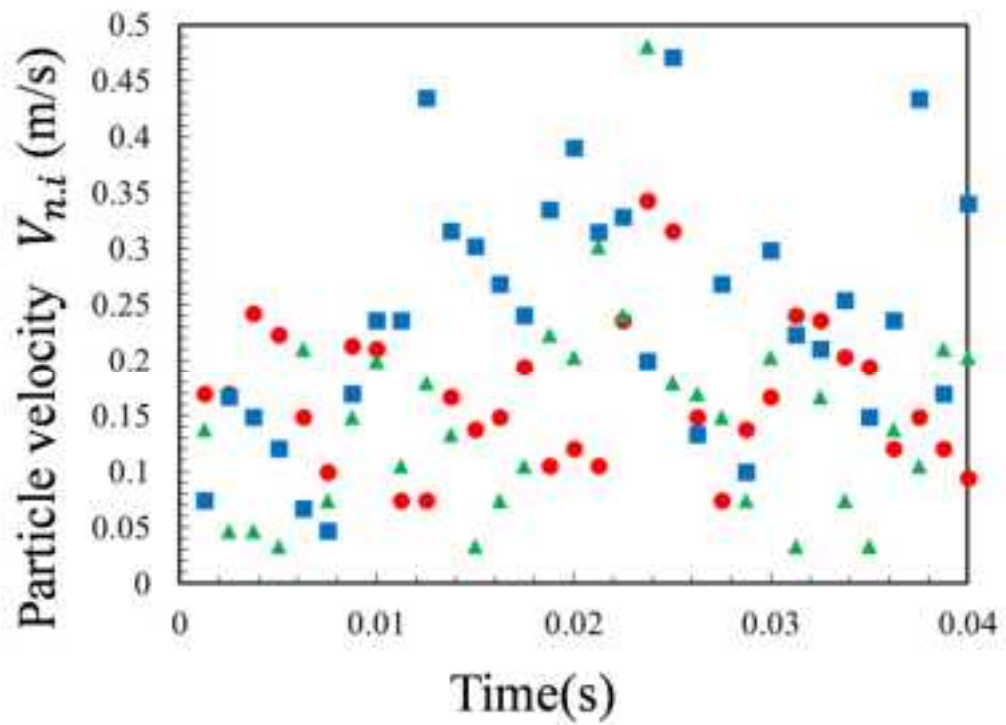


図 3.46 気泡内粒子の速度

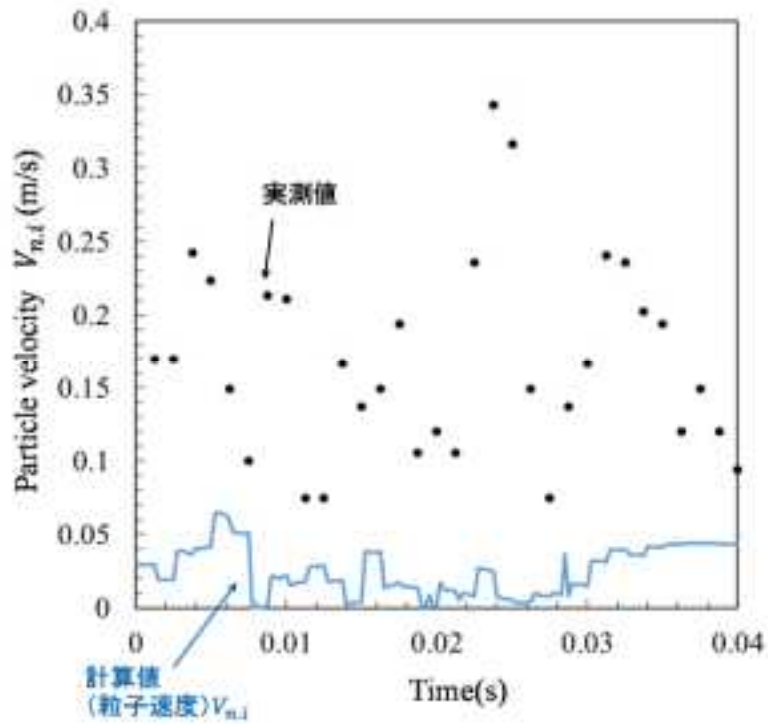


図 3.47 粒子（赤）の速度と計算値の比較

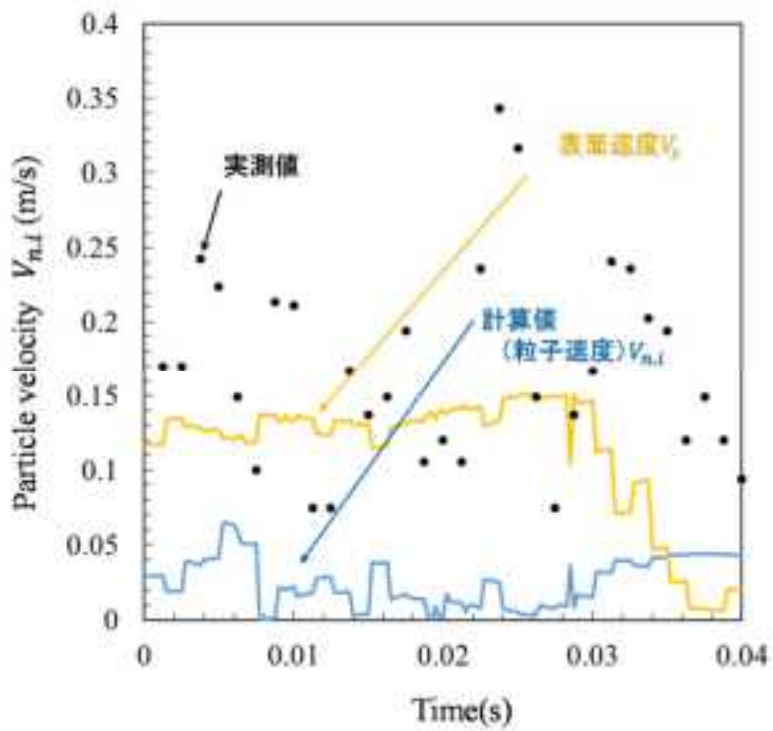


図 3.48 粒子（赤）の速度と表面速度の比較

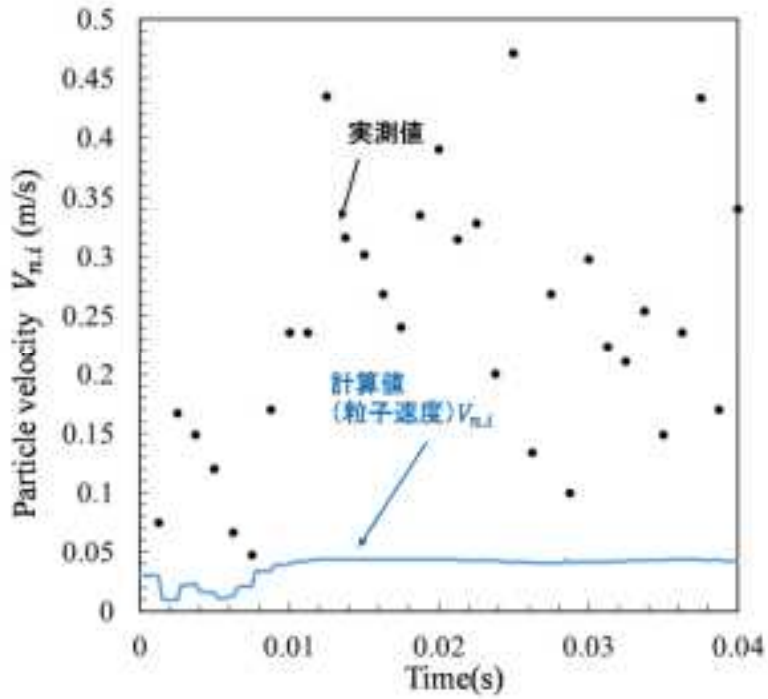


図 3.49 粒子（青）の速度と計算値の比較

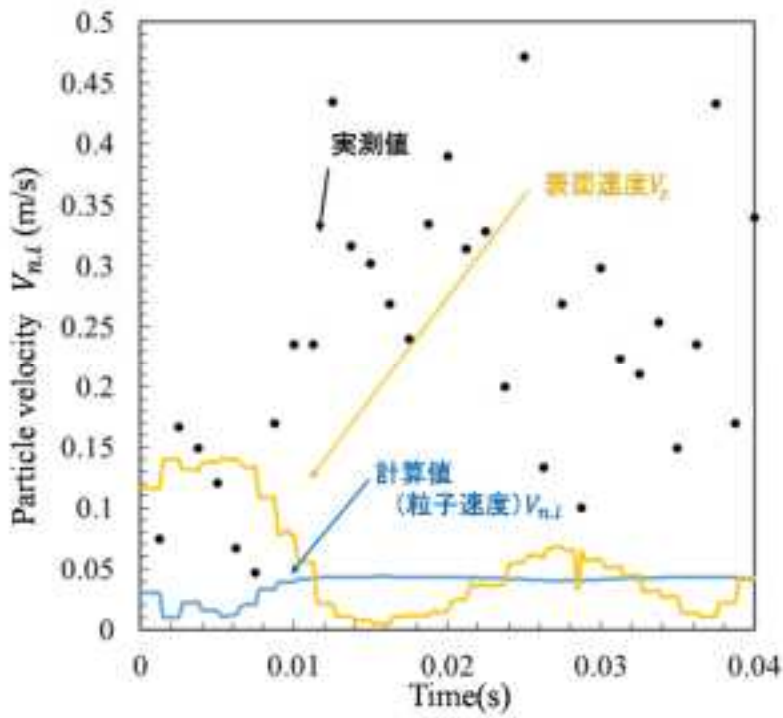


図 3.50 粒子（青）の速度と表面速度の比較

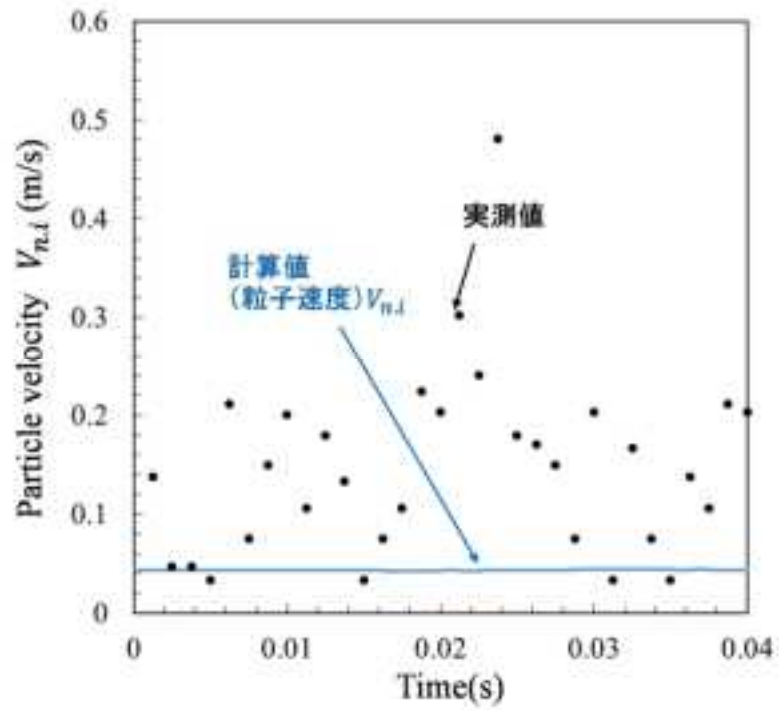


図 3.51 粒子（緑）の速度と計算値の比較

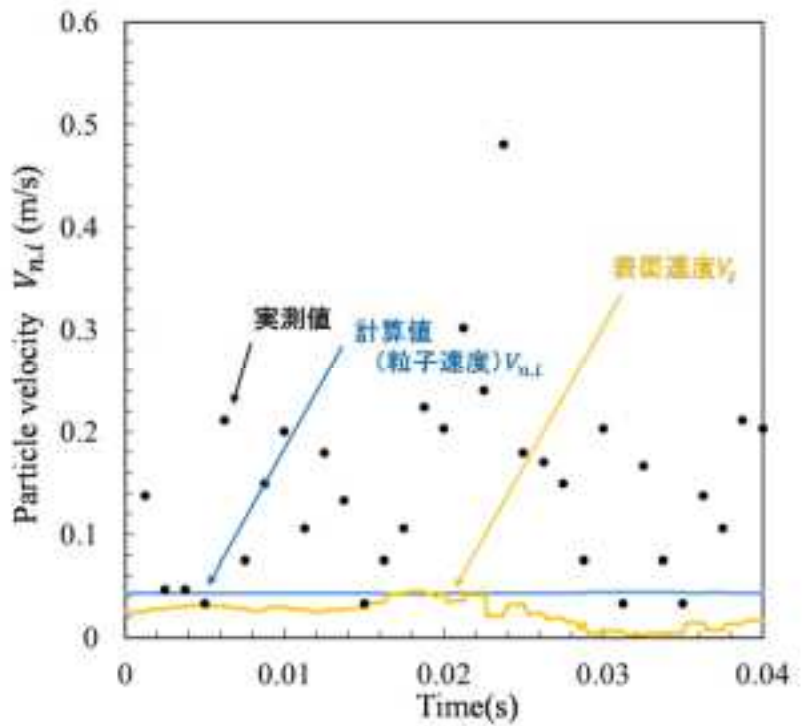


図 3.52 粒子（緑）の速度と表面速度の比較

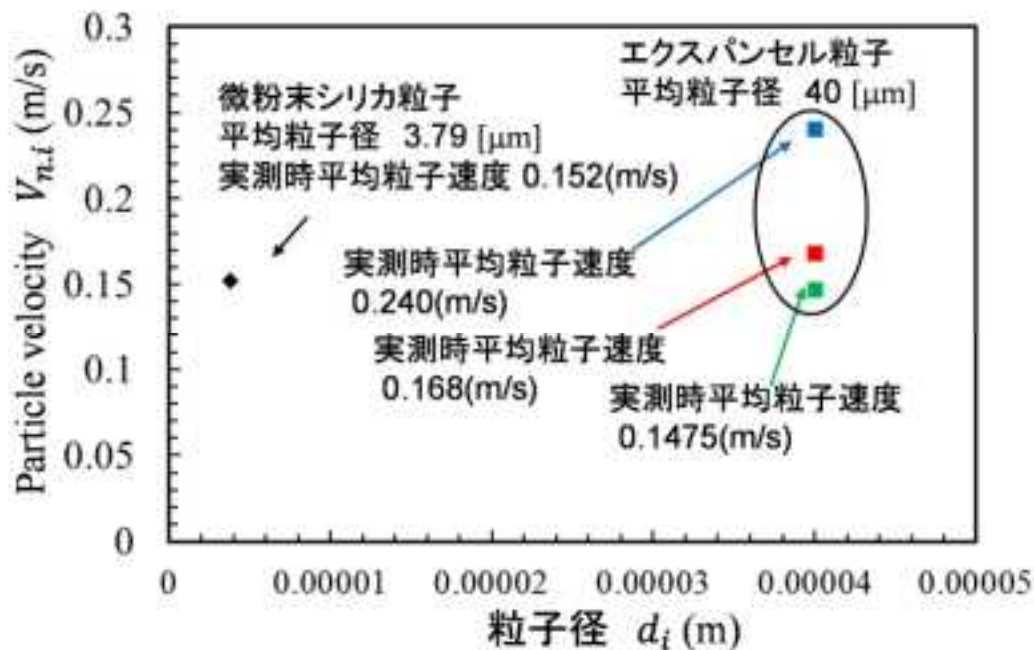


図 3.53 粒子径 d_i と粒子速度との比較

3.2.5 まとめ

単一気泡によるエアロゾル挙動測定実験を行った。基本仕様の基において以下の測定を実施した。

気泡形状

- ・上昇気泡の追従撮影を可能にし、従来のオイラリアン計測に加え長時間気泡の挙動を観察可能であるラグランジアン計測を実現した。
- ・上昇気泡の長軸及び短軸の時間変化を計測し、形状変化を測定した。

気泡及びエアロゾル粒子の速度分布

- ・上昇気泡内のエアロゾルを模擬した粒子の観察に成功した。
- ・上昇気泡内のエアロゾル模擬粒子の三次元PIVが可能なシステムを構築し測定を実施した。
- ・上昇気泡内のエアロゾル模擬粒子の挙動を、PTV計測し粒子の軌跡を計測するとともに、速度分布を取得した。
- ・MELCOR内の気泡内粒子速度を表すモデル式を用いて、考慮されているモデルの感度計算を行った。
- ・MELCOR内の気泡内粒子速度を表すモデル式を用いて、実験条件にあてはめPTV計測にて求めた粒子速度との比較検討を行った。

エアロゾル濃度及びその変化

- ・エアロゾル濃度を計測するための装置の導入を行い、LIF 計測及びホログラフィ計測が可能になった。

気相体積

- ・上昇気泡の形状変化の測定に伴い、時間変化での気泡の体積変動を測定し、気泡の体積を求めた。

液温及び気相温度（試験装置内で複数点、大まかな空間分布）液相内で温度成層化を形成させる場合は、高さ方向の液温温度分布（詳細分布）

- ・液温及び気相温度を計測するための、装置を整えた。
- ・電気温水器の導入により、温度成層化の形成を可能にした。

3.3 気泡 2 相流挙動評価時実験装置の製作及び試験

本実験では、プールスクラビングにおける 2 相流挙動の把握のため、エアロゾルなしの条件においてプール中にガスを連続的に噴出させることで、実際のプールスクラビングと同等の条件の下で多数の気泡が上昇する際の 2 相流動様式を同定するとともに、ボイド率、界面積濃度、気泡の合体・分裂などの特徴的な流動及び気泡形状、気泡径分布、気泡塊の平均上昇速度などの気泡挙動特性の計測するための実験装置を製作し、試験を実施する。表に実験の基本仕様を示す。図に実験装置の概念図を図 3-54 示す。図 3-54 に示すように、水を溜めた実験部容器内に実機相当条件を模擬したガスを流入させる。ガスの上昇過程における 2 相流動の変化を、高速度カメラやボイド率測定装置等を用いて計測する。流体条件は大気圧、常温 $\sim 100^{\circ}\text{C}$ とし、ガス流量、ガス成分割合等をパラメータとして幅広い条件での気泡の観察を行い、データを採取する。

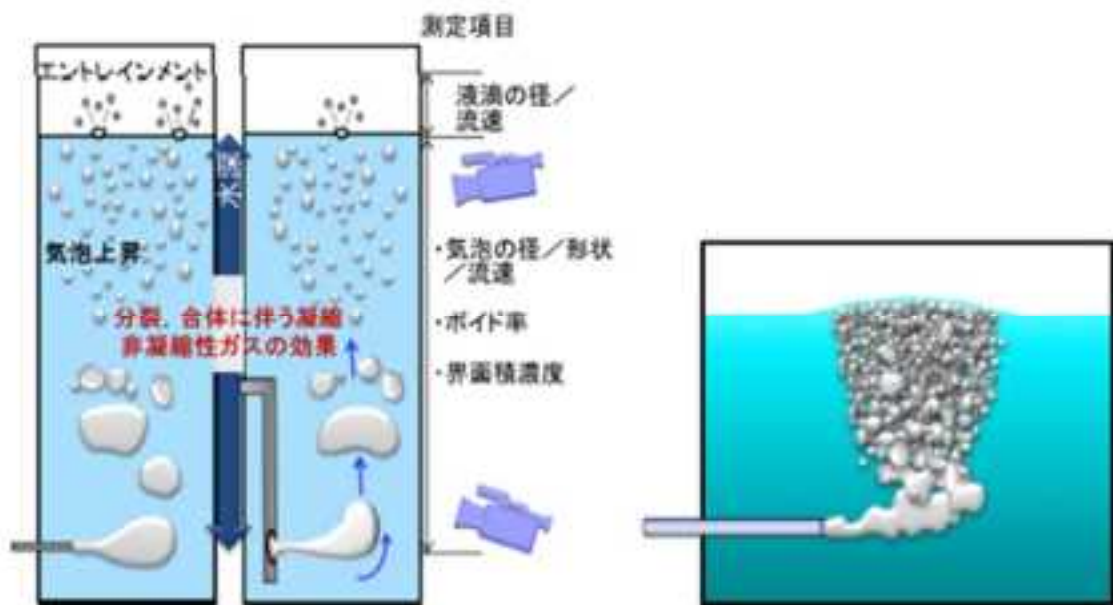


図 3-54 気泡の 2 相流挙動評価実験装置 試験部概念図

表 3-1 気泡の 2 相流挙動評価実験基本仕様

項目	内容	備考
装置構成	試験部容器, コンプレッサあるいは窒素ポンペ, ボイラ等	実験部容器の詳細寸法は発生気泡径、スケール則及び壁の影響等を考慮し、実験の計画時に検討すること。なお、装置は対象とする 2 相流の挙動を、ノズル吹出挙動、気泡塊上昇挙動等の詳細把握のため、個別に製作しても良い。
計測機器	高速度カメラ、ボイド率測定装置等	実験計画及び予備実験により最適な機器を検討する。
試験条件	大気圧, 常温~100℃	
作動流体	水-空気 (窒素) 水-蒸気 (上記 2 条件はスケーリング特性の確認のため、水以外の作動流体も考慮可) 水-蒸気-非凝縮性ガス	
試験パラメータ	<ul style="list-style-type: none"> ・ガス噴出し方向：下、横、上 ・穴形状：円 (基本)、破損口形状 (適宜、理想化) ・口径：3 種類 (クエンチャ、ベント管を模擬し、スケーリングを考慮して寸法決定) ・ガス流出速度：単気泡相当の流速条件+ ~十分に大きな速度範囲 ・非凝縮性ガス濃度：0~100% ・サブクール度：液温が常温から飽和温度近傍までの範囲 (高さ方向に大きな温度勾配を設定する実験条件も含む) ・サブマージェンス：100mm 弱~2000mm 強 	ガス流出速度の上限に関しては、スケール則等を考慮し、実機の流動を模擬できる範囲を検討する。

<p>計測項目 (ただし、今年度においては、一部を要開発項目として検討する)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 気泡の径、形状及び流速の分布 ・ 気泡塊（クラスタ又はプルーム）の平均上昇速度 ・ ボイド率分布 ・ 界面積濃度 ・ 界面又は液面から発生する液滴の径及び速度の分布 ・ 2相流流動様式の特特定及び合体・分裂挙動の把握のための可視化情報 ・ 液温及び気相温度（実験装置内で複数点、大まかな空間分布） ・ 液相内で温度成層を形成させる場合には、高さ方向の液温温度分布（詳細分布） 	
--	--	--

3.3.1 実験手法の検討

表 3-1 に記載されている計測項目として 2 相流動様式の特定制及び合体・分裂挙動の把握のための可視化情報とあり、それを実施するための実験手法を図 3-55 のように検討した。比較的流量条件かつ噴流表面に存在する気泡に関しては、LED と高速度カメラを用いたバックライト法による可視化撮影を行い、得られた結果を画像処理することで気泡径や気泡上昇速度等、基礎的な物理現象を把握する。また噴流の断面（内部）の二相流挙動の把握に関してはレーザー誘起蛍光法(LIF)を検討した。LIF は流れ場に適当な波長のレーザーを照射し、励起された流体中の特定物質の蛍光発光から流れ場の情報を得る可視化技術である。また、二相流動の重要なパラメータであるボイド率はワイヤメッシュセンサを用いて計測する

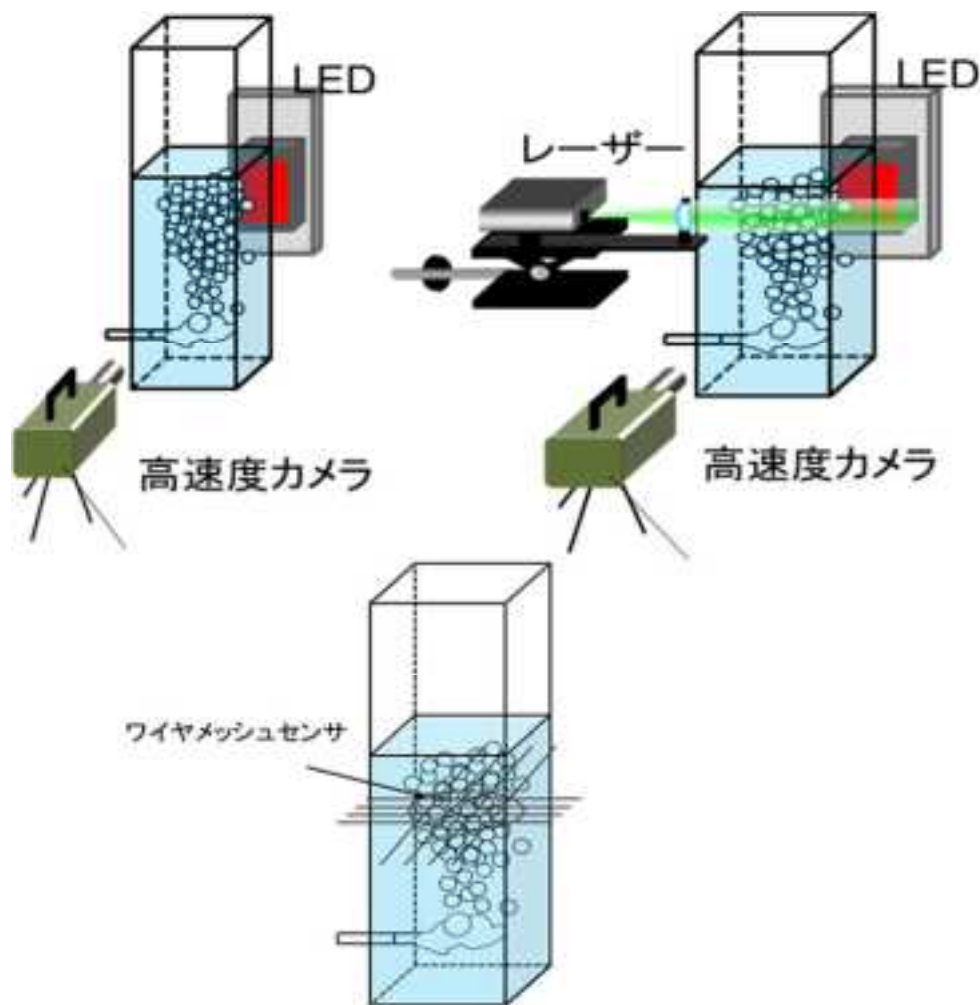


図 3-55 実験手法の検討

3.3.2 試験装置の製作

前述した業務内容およびコンセプトを踏まえた実験系統図を図 3-56 に示す。装置構成は、前年度製作した単一気泡実験装置（図 3-56）の試験部までのラインを併用する形で、コンプレッサ、窒素ポンベ、ボイラーから気相の供給を行い窒素ガス、空気に関しては蒸気と混合する前に予熱を行う。次に窒素、空気、蒸気を二つに分け一方は、エアロゾル注入部に接続されもう一方は混合部に接続される。分けられた気相は混合部にて合流させて、試験部へと送り計測を行う。試験容器内において、気泡注入ノズルから放出された気泡噴流を可視化撮影、ワイヤメッシュセンサを用いて、ボイド率計測および気泡界面速度計測を行う。計測を終えた、蒸気、窒素、空気、及びエアロゾルを含む気泡は試験部より凝縮器、排水タンクを含む排気系へと送られ安全に処理される。なお試験部への給水は、試験部容器下部から行き排水も同じく行う。また今年度、温度成層条件を実現するために電気温水器を導入し、水槽下部および、水槽上部より直接給湯を行う。当報告では、図 3-58 エラー! 参照元が見つかりません。に示すように、今年度製作した試験部（水槽、架台、計測可動部）および前年度より追加された部分について記述する。

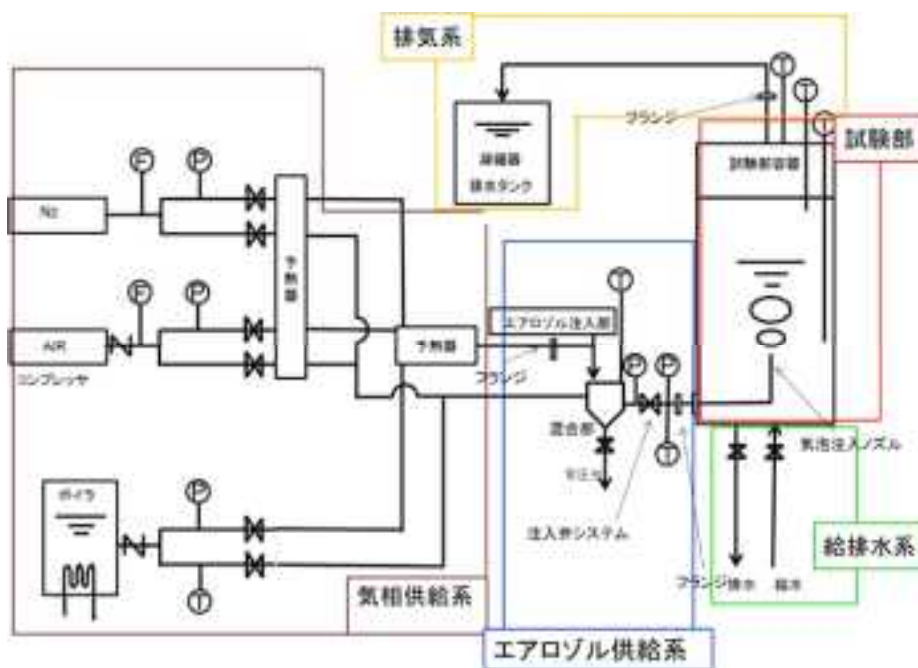


図 3-56 昨年度製作した単一気泡挙動測定実験装置の系統図

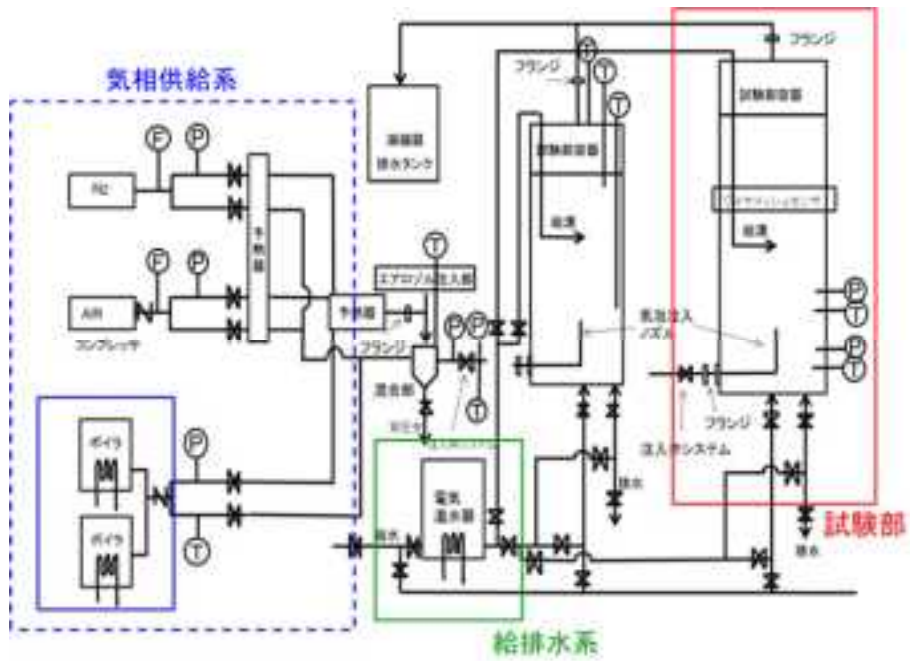


図 3-57 今年度製作した二相流挙動評価実験装置を追加した全体の系統図

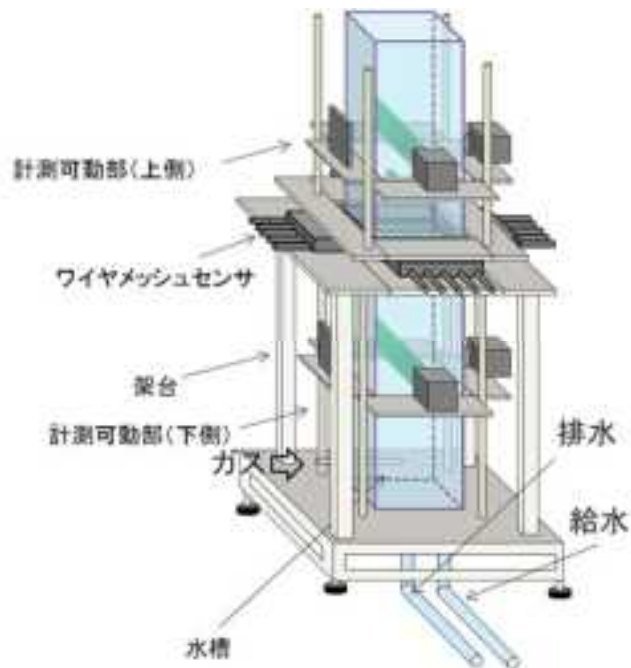


図 3-58 気泡の2相流挙動評価実験 試験部概要図

3.3.2.1 試験部容器

前述の表 3-1 に示す計測項目を可能とする試験を行うための試験部容器を考案した。水槽の形状は基礎的知見として可視化面が比較的大きくかつ容易な直方体水槽を採用した。材質として、試験条件が常温～100℃と仕様書に記載があり耐熱 120℃まで耐えられかつ、PIV などの可視化計測のため透過性に優れたポリカーボネートを用いた。気泡注入ノズルについては耐熱性に優れたステンレスノズルを用いた。ノズルの仕様は昨年度のものと同様に、ガス吹き出し方向は下、横、上、穴形状は円とし、内径 3mm, 6mm, 10mm と大きくしたものを、L 型ノズル、直線ノズルと二種類のノズル型を用意した。

ノズルの設計において仕様に記載されている流速条件での L 字型ノズルの湾曲部に掛かる反力を予備計算した、計算には図のような断面積 A の 90° 曲がり管を流体が流量 Q, 流速 u で流れるとき、曲がり管に働く力を考える。管内圧力は P である。x, y 2 方向を考えると、x, y 各方向についての運動量の法則は次式となる。

$$F_x = \rho Qu - 0 + PA$$

$$F_y = 0 - (\rho Qu) + PA = F_x$$

F はこれらの合力で $F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$ である。力 F の方向は入口流れ方向から 45° の角度である。実験条件として水頭圧（水深 2000mm）以上の圧力で気相を噴出させるために必要な最低圧力 P は $P=0.002\text{MPa}$ である。ノズル内径 3mm, 管内流速 270m/s (流量 $Q=115\text{L/min}$) の時の管に掛かる力は

$$F_x = F_y = \rho Qu + PA = 0.74$$

ストレート管であれば最大で 0.74N 程度の反力がノズルに掛かることが予想された。また、曲がり管であれば合力であるので

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = 1.047$$

となり、最大で 1.047N 程度の反力がノズルに掛かることが予測された。以上の予備計算よりノズルの設計を行った。製作したノズルの設計図を図 3-59 に示し、写真を図 3-60 に示す。

水槽寸法の決定は、十分に大きな速度範囲のガス流出速度条件で試験を行うことを考慮し、予備実験として図 3-61 のような横吹きノズルを用いた気泡噴流の可視化観測を行った。実験結果を図 3-62 図 3-63 に示す、また気泡噴流の水平方向距離および、予測軌道を既存研究の実験式を用いて予備計算した。以下に計算式を示す

$$Fr_m = \rho_g Q_g^2 / (\rho_L g d_{ni}^5)$$

ここで、 Fr_m は修正フルード数、 ρ_g はガスの密度、 d_{ni} はノズル内径、 Q_g はガス流量、 ρ_L は液体の密度である。そして気泡噴流の水平方向到達距離 L_H は次の実験式で表される。

$$L_H = 3.7 d_{ni} Fr_m^{1/3}$$

式を用いた気泡噴流の軌道 (x_m, y_m) の実験式を以下に示す。

(1) Themelis et al

$$\frac{x_m}{L_H} = 1.22 (y_m / Fr_m)^{0.21}$$

この実験式は水槽壁から突き出したノズルに対してのものである。

(2) Iguchi et al.

$$\frac{x_m}{L_H} = 0.74 (y_m / Fr_m)^{0.3}$$

この実験式は容器側壁に埋め込まれたノズルに対するものである。これらの実験式を可視化結果と比較すると図 3-64 のように定性的に良い一致を示した。

次に前年度、製作した単一気泡装置（内径 300mm 八角水槽）を用いて、サブマージェンス 1000mm 条件下において、上昇気泡群の広がりを観察した。実験結果を図 3-65 に示す。結果より、比較的低流量条件においては、水槽壁の影響を受けずに安定した上昇気泡の挙動を観察できることを確認した。高流量条件では、水槽全体において、気泡の密度が高く、水槽壁付近には噴流による後流が発生していることを気泡の移動方向より確認した。以上を考慮して、水槽断面は 500mm×500mm 以上は必要であると判断した。

次にノズル位置の検討した。気泡噴流の高さ毎にボイド率分布計測を行うために、図 3-66 のようなワイヤメッシュセンサの位置を変更せずノズルの位置と水位を変更することで、相対的にワイヤメッシュセンサによるボイド率の計測位置を変更する方法を考案した。図 3-67 に示すようにノズル間隔は 200mm で十分であると判断した

以上を踏まえて水槽の寸法を決定した。決定した寸法を図 3-68 に示す

また計測機器としてワイヤメッシュセンサを用いているため、試験部水槽において、図

3-69 のように上部の水槽と下部の水槽でワイヤメッシュセンサを挟み込む構成となっている。それぞれの水槽の詳細な仕様について記述する。水槽 1 はワイヤメッシュセンサを介して上部の水槽である。水槽 1 の概要は、全長 1000mm、試験部容器厚さ 20mm の矩形水槽である。圧力および温度を 200mm ごとに計測できるような構成とした。水槽 1 の仕様を以下に示す。その設計図を図 3-70 に写真を図 3-71 に示す。

水槽 1 の仕様

- ・形状：直方体
- ・高さ：全長約 1000mm
- ・材質：ポリカーボネート製
- ・対面長さ（内側）：500mm
- ・対面長さ（外側）：540mm
- ・ポリカーボ厚さ（側面）：20mm
- ・フランジは水槽上下に二つ取付け、ポリカーボネート製であること
- ・フランジ接続面を密封する O リングも含むこと
- ・高さ方向に 5 点の温度計測用ノズルを設ける
- ・同様に高さ方向に 5 点の温度計測用ノズルを設ける
- ・圧力計及び温度計を挿入するポートを開ける、なおポートはすべて間止めする
- ・水温 100℃まで耐えうることとする
- ・水槽上部のフランジと接続する蓋も用意することとする

水槽 2 はワイヤメッシュセンサを介して下部の水槽である。水槽 2 の概要は、全長 1900mm、試験部容器厚さ 20mm の矩形水槽である。ノズル位置を 200mm ごとに変更できるような構成とし、ノズル位置に対応して圧力および温度を 200mm ごとに計測できるような構成とした。水槽 2 の仕様を以下に示す。その設計図を図 3-72 に写真を図 3-73 に示す。

水槽 2 の仕様

- ・形状：直方体
- ・高さ：全長 1900mm
- ・材質：ポリカーボネート製
- ・対面長さ（内側）：500mm
- ・対面長さ（外側）：540mm
- ・ポリカーボ厚さ（側面）：20mm
- ・フランジは水槽上下に二つ取付け、ポリカーボネート製であること
- ・フランジ接続面を密封する O リングも含むこと
- ・高さ方向に 9 点の温度計測用ノズルを設ける
- ・同様に高さ方向に 9 点の温度計測用ノズルを設ける
- ・圧力計及び温度計を挿入するポートを開ける、なおポートはすべて間止めする
- ・水温 100℃まで耐えうることとする
- ・側面高さ方向 200mm ごとにノズルを挿入するフランジをつける

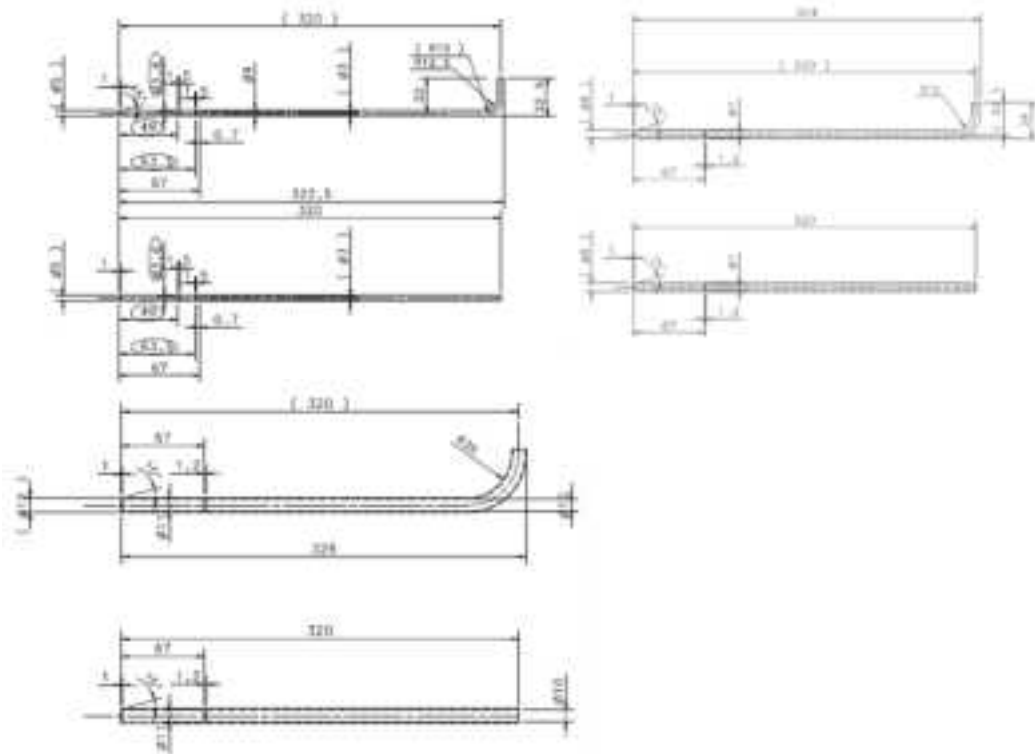
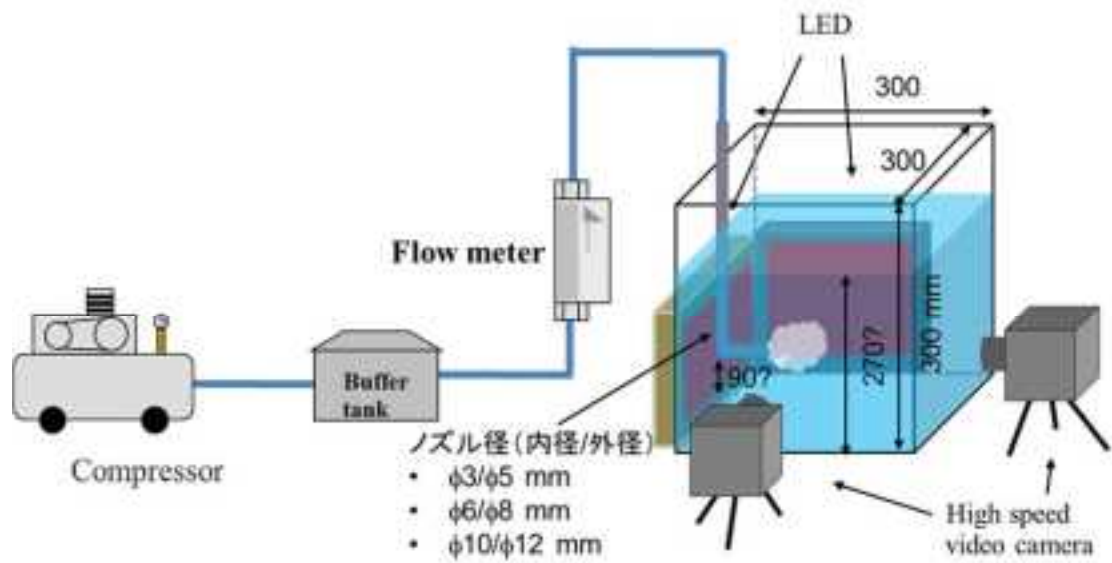


図 3-59 ノズル設計図

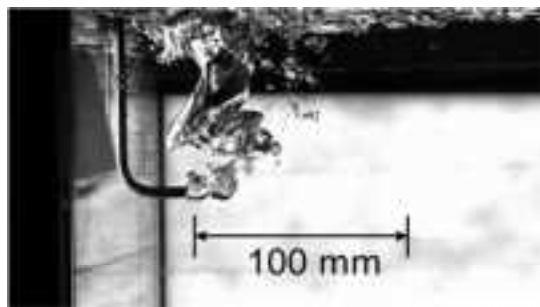


図 3-60 ノズル写真

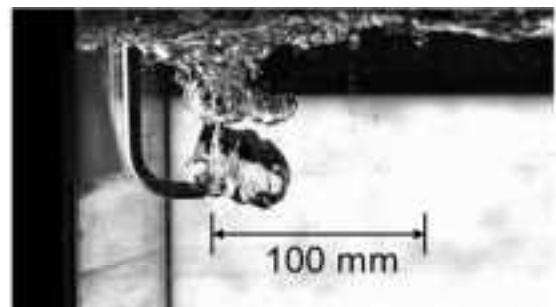


130

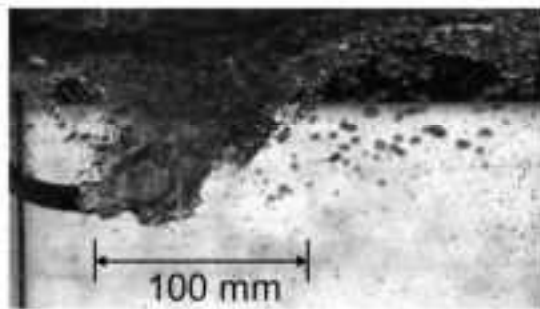
図 3-61 横吹き気泡噴流予備実験体系



$\phi 3/\phi 5$ mm



$\phi 6/\phi 8$ mm



$\phi 10/\phi 12$ mm

図 3-62 各ノズル内径の気泡噴流挙動 (気相見かけ速度=50m/s)

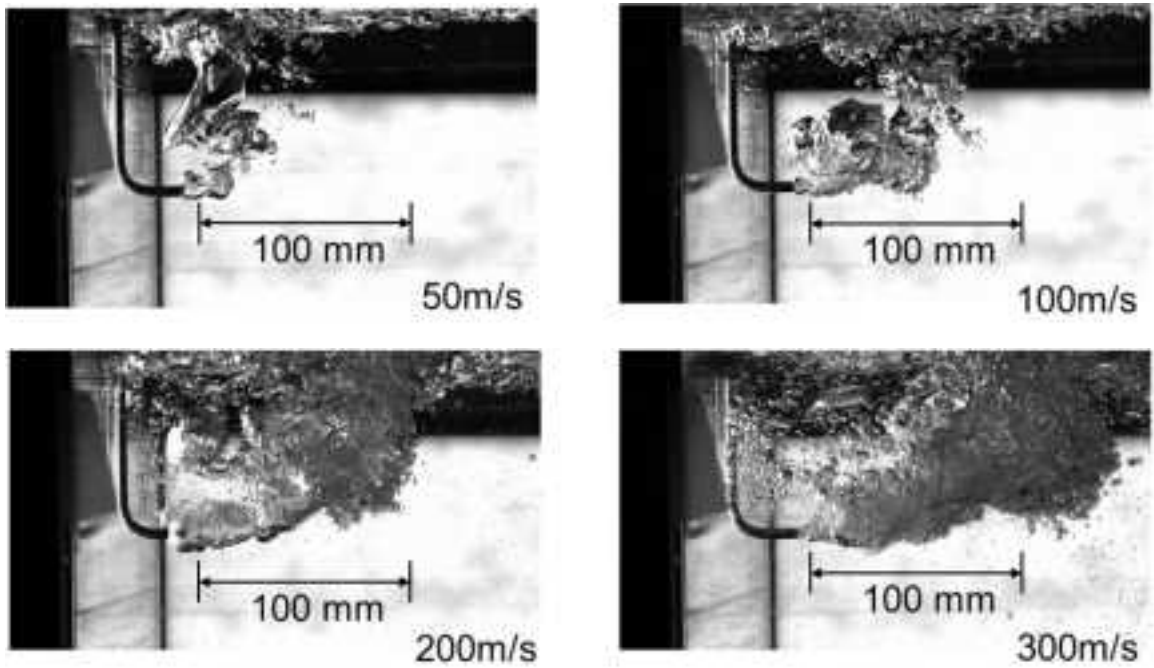


図 3-63 各見かけ流速の気泡噴流挙動（ノズル内径=φ3/外径=φ5mm）

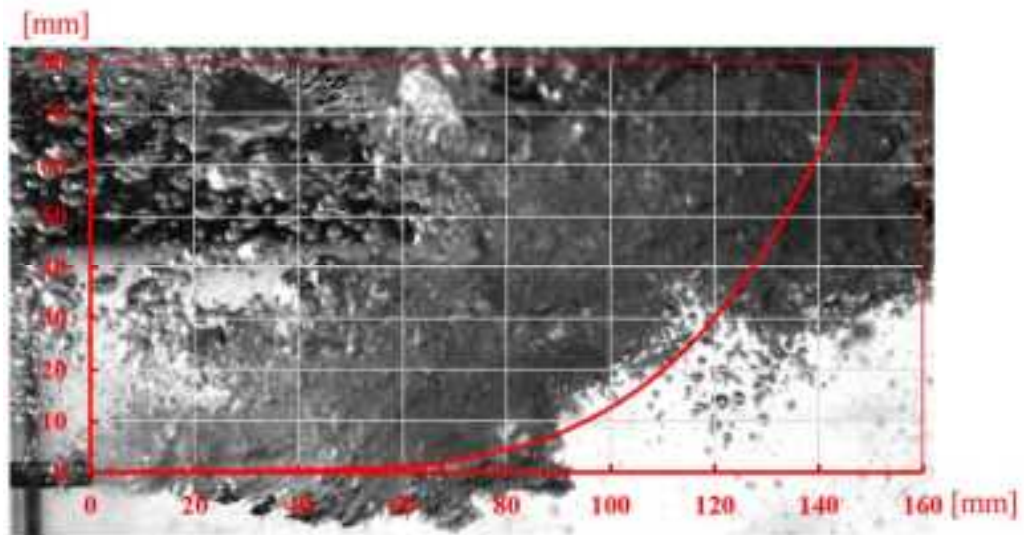


図 3-64 Themelis らの実験式との比較（ノズル内径 3mm, ノズル見かけ流速 300m/s）

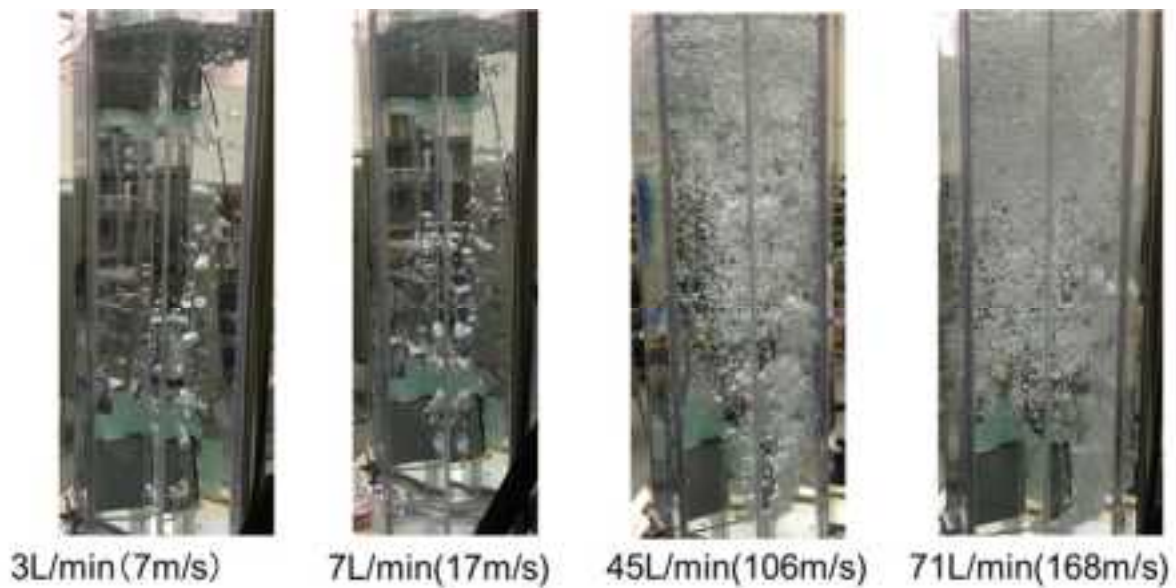


図 3-65 サブマージェンス 1000mm における各流量の上昇気泡群挙動

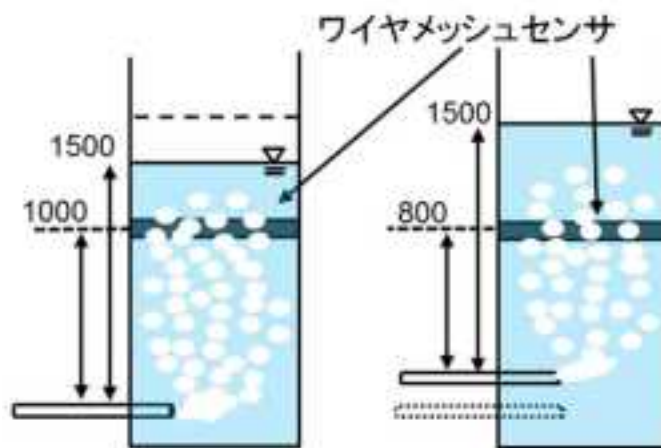


図 3-66 ワイヤメッシュセンサによるボイド率計測位置

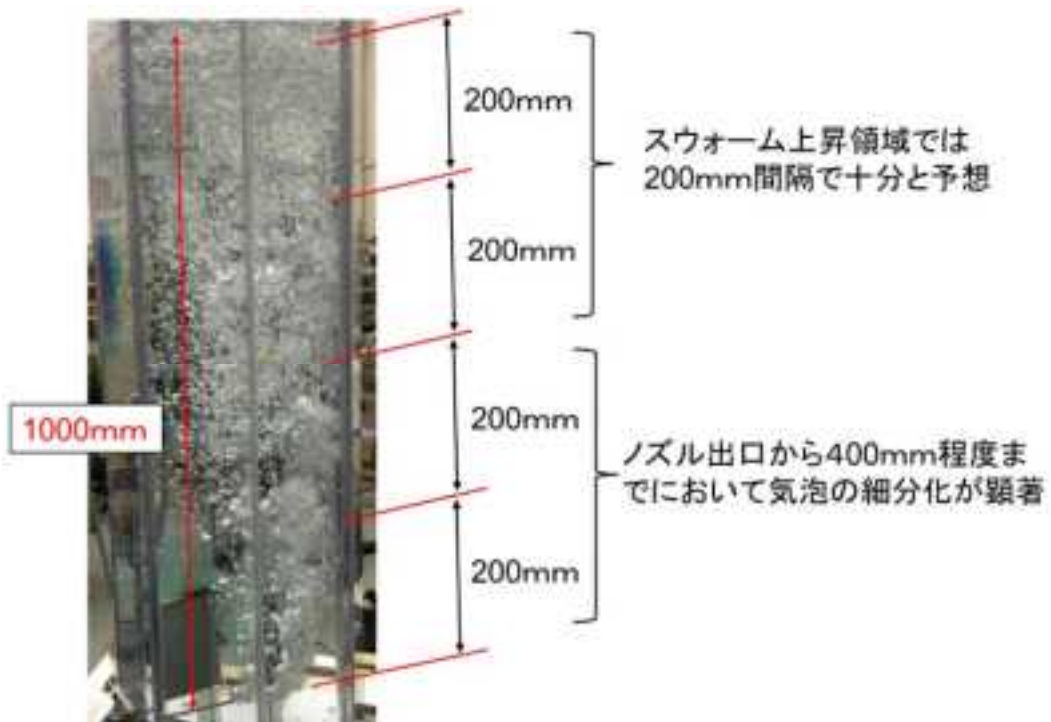


図 3-67 ノズル間隔の確認

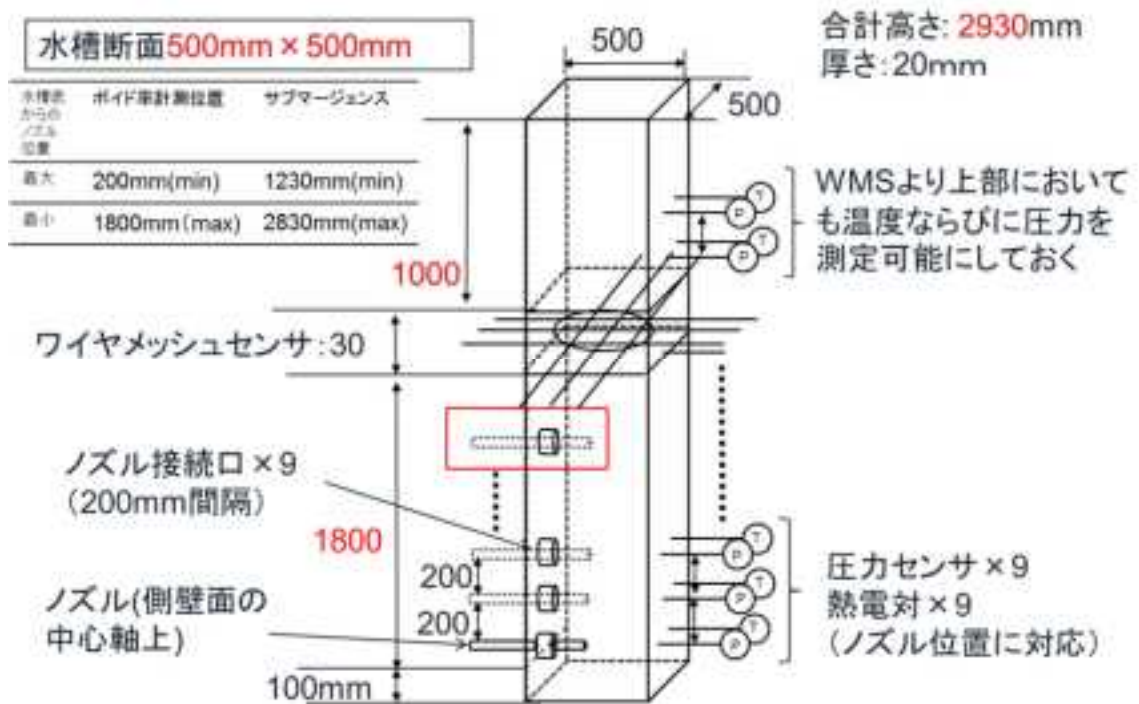


図 3-68 決定した水槽寸法



図 3-71 水槽 1 写真

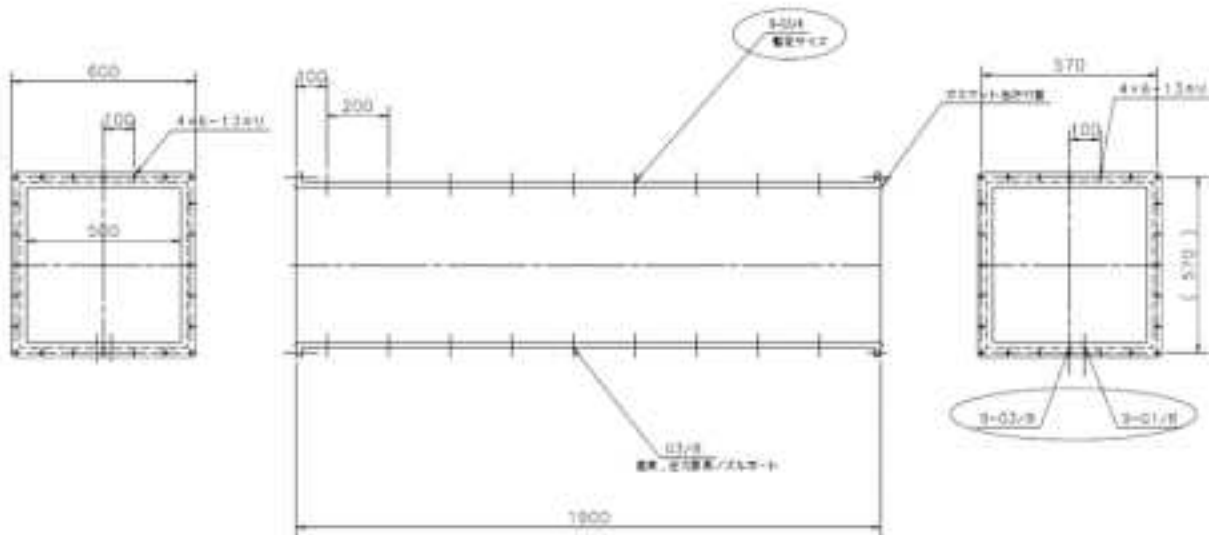


図 3-72 水槽 2 設計図



図 3-73 水槽 2 写真

3.3.2.2 架台

今年度製作した試験部は水槽と架台と計測可動部で構成されており、本学に既設の排供給系へ接続される。試験部において透明な 2 つの水槽よりワイヤメッシュセンサを上下から挟み込んだ構造である。架台は、上下の水槽ならびにワイヤメッシュセンサ等を保持するとともに、水槽への給排水系配管等の接続を行うためのものである。架台の具体的な仕様は以下に示す。その設計図を図 3-74 に写真を図 3-75 に示す。

架台仕様

- ・水槽ならびにワイヤメッシュセンサ等を保持するための、耐久性能ならびに耐荷重性能を有すること
- ・水槽の底ならびに上部に既設の給排水系を接続・設置するためのスペースを確保すること
- ・水槽、ワイヤメッシュセンサおよび計測部の寸法、重量等を考慮すること
- ・ワイヤメッシュセンサおよび上下の水槽を架台に固定するための機構を有すること
- ・上部の水槽ならびにワイヤメッシュセンサの重量を架台で支持するような機構にし、上部の水槽の重量がワイヤメッシュセンサにかからないようにすること
- ・上部ベース上ならびに下部ベース上に計測可動部を設置できるようにすること
- ・寸法に関しては、ワイヤメッシュセンサおよび水槽の寸法、重量を十分考慮すること

- ・ワイヤメッシュセンサ, および既設給排水系との接続が可能な構造とすること

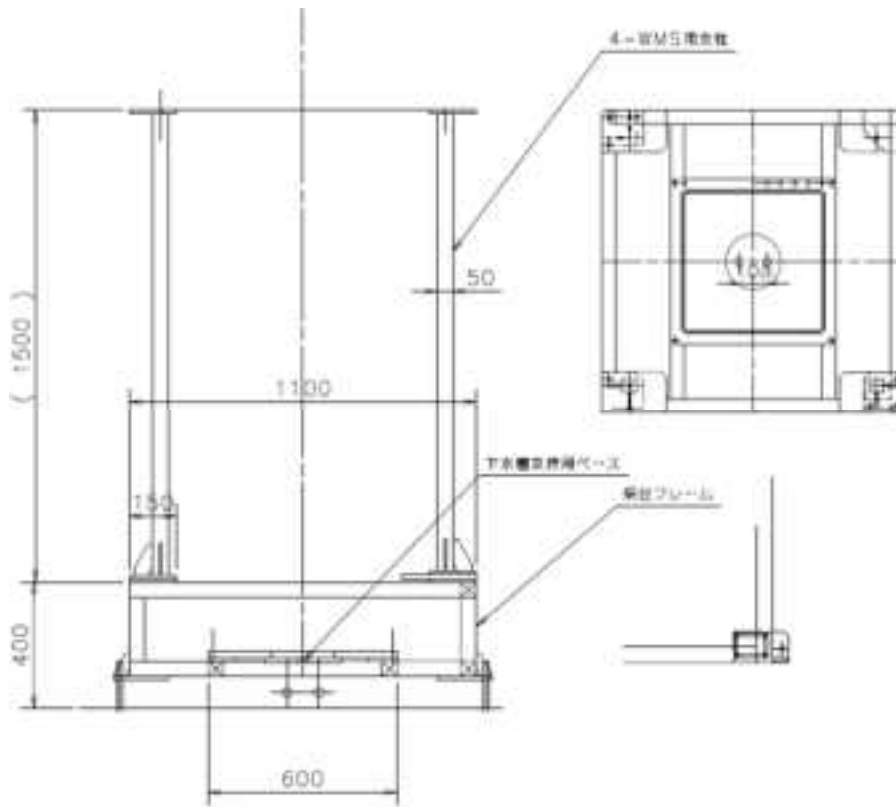


図 3-74 架台 設計図



图 3-75 架台 写真

3.3.2.3 計測可動部

計測可動部はカメラ及びレーザー・LED ライトを設置するステージであり、高さ方向に可動な機構を有するものである。なお計測可動部は上部ベース上および下部ベース上の 2 箇所を設置する構成とした。計測可動部の仕様を以下に示す。その設計図を図 3-76 に写真を図 3-77 に示す。

計測可動部仕様

- ・計測可動部は上部ベース上および下部ベース上の 2 箇所に設置すること
- ・カメラ及びレーザー、LED ライトを固定できるステージを有すること
- ・カメラ等を設置する計測可動部は組み立て式にし、取り外しによりステージの高さ位置調節が可能であること
- ・計測可動部の寸法に関しては、ワイヤメッシュセンサおよび水槽の寸法、重量を十分考慮すること
- ・ワイヤメッシュセンサ、架台との接続が可能な構造とすること
- ・仕様に示す寸法は 20% の範囲での変更に応じられること

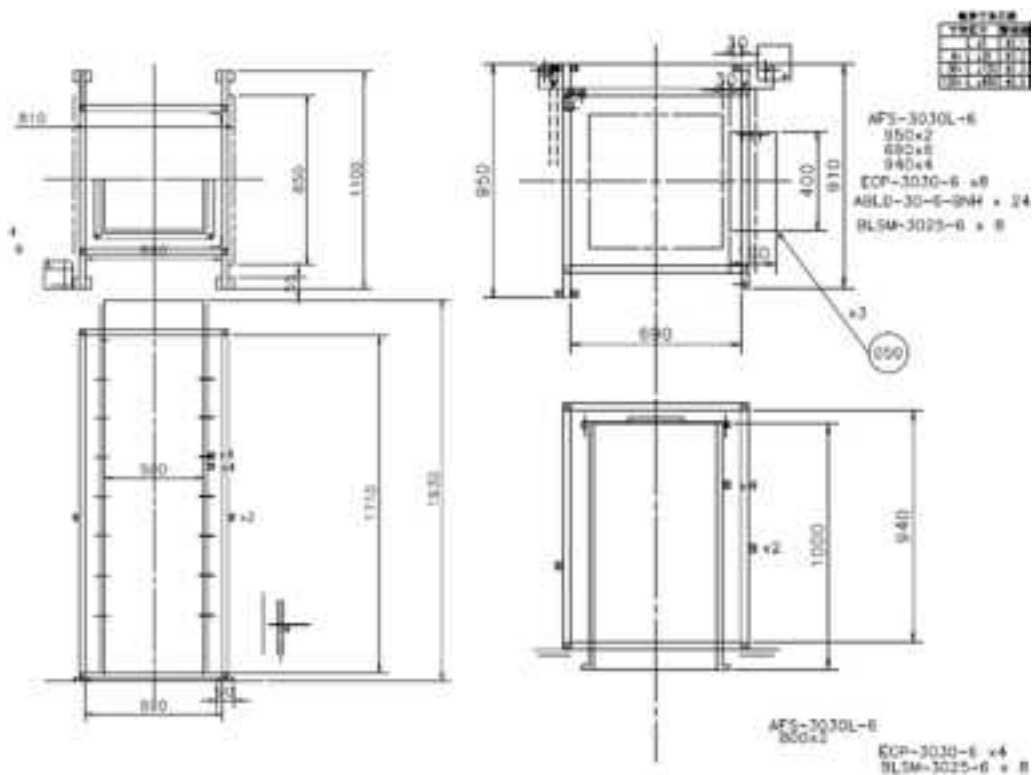


図 3-76 計測可動部 設計図



図 3-77 計測可動部 写真

3.3.2.4 気相供給系

前年度、蒸気、窒素ガス、空気からなるエアロゾル粒子を含む単一気泡を生成するための気相供給を行うため気相供給系を製作した。供給源として電気式簡易貫流ボイラー及び軟水器を設置したが、今年度の実験条件に非常に大きな速度範囲となっており、それに伴い、蒸気流量を高くする必要がある。そのため、今年度、電気式簡易貫流ボイラー及び軟水器を新たに追加設置した、写真を図 3-78 に示す。



図 3-78 ボイラー及び軟水器

3.3.2.5 給排水系

仕様に記載されている液相内で温度成層を形成させる方法として電気温水器図 3-80（仕様：表 3-2）を用いる方法を考案した。具体的な方法は図 3-79 のように電気温水器より生成された温水を試験部水槽へ下部から注入し、次に冷水を試験部から注入することで温水と冷水の温度差による密度の違いを利用した方法である。また、水槽上部より直接給湯する方法も行えるような構成にした。給湯配管系統図を図 3-81 に示す。また電気温水器の温度が最大で 60℃までしか昇温できないため、次年度以降、図 3-82 のように電気温水器の後にタンクを設けてシーズヒーターを設置し、追加加熱することで温度を 90℃付近まで上昇させる。

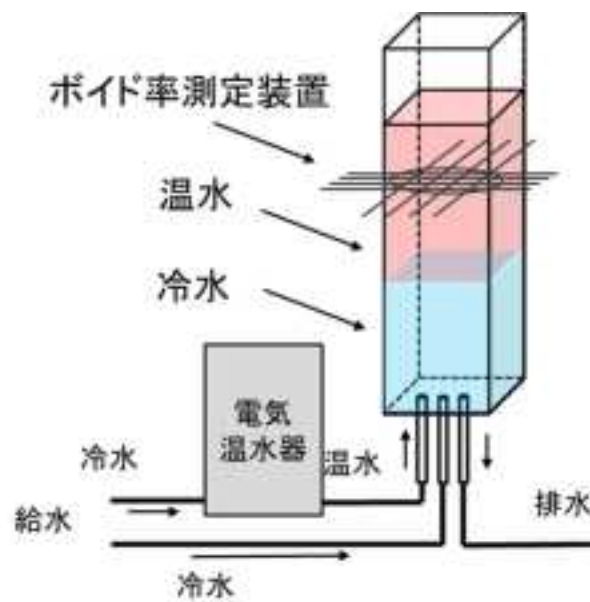


図 3-79 試験部水槽への給湯方法



貯湯ユニット



ヒートポンプユニット

図 3-80 電気温水器 写真

表 3-2 電気温水器 仕様

ヒートポンプユニット形名	HWH-F564
適わきあげ温度範囲	約65°C～約90°C(水温・外気温により可変)
貯湯ユニット形名	HWH-F564T
タンク容量	560L
設置可能最低外気温度	-10°C
給湯温度設定	27°C～48°C(1°Cステップ), 50°C, 55°C, 60°C
浴槽目安	120L～450L

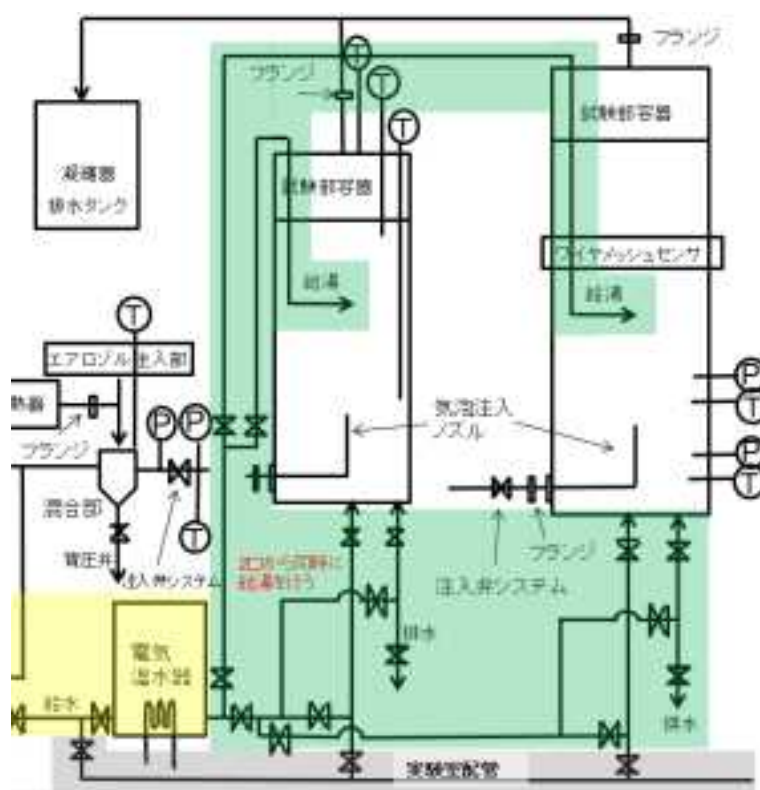


図 3-81 試験部への配管系統図

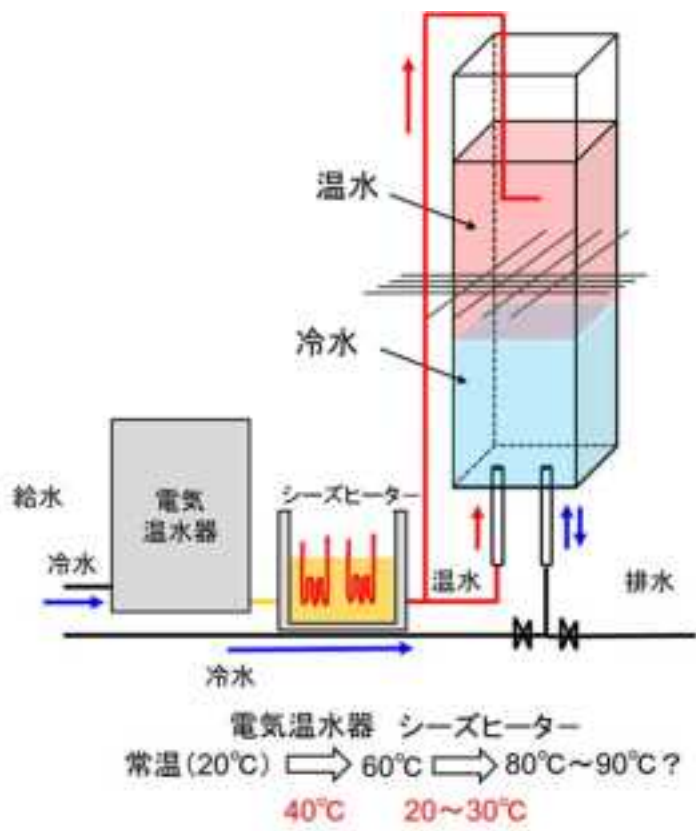


図 3-82 シースヒーター設置案

3.3.3 計測機器

表 3-1 より計測機器にて高速度カメラ、ボイド率測定機器と記述があるため概要を示す。

3.3.3.1 高速度カメラ

可視化撮影のための高速度カメラは昨年度購入した FASTCAM mini UX 4k を用いた。図 3-83 にカメラの写真を示す。カメラの仕様を表 3-3 高速度カメラ仕様表 3-3 に示す。



図 3-83 高速度カメラ写真

表 3-3 高速度カメラ仕様

フル解像度	1280x1024
最高撮影速度(フルフレーム)	4,000fps
最高撮影速度(分割フレーム)	800,000fps
最短露光時間	1 μ s*
濃度階調	モノクロ:AD 変換 12bit/カラー:AD 変換 36bit(RGB 各 12bit)
レンズマウント	F マウント(Gタイプレンズ対応)、C マウント
トリガーモード	スタート、センター、エンド、マニュアル、ランダム
各種信号入出力	入力:トリガ(TTL/接点)、同期信号、レディ信号、イベント信号、IRIG 出力:トリガ、各種同期信号、レディ信号
外部機器同期	5Vp-p 負極/正極(切替可) 可変周波数同期が可能
メモリ分割	最大 64 分割
デジタルインターフェイス	ギガビットイーサネット
カメラ制御ソフト「PFV」	複数言語対応(日、英、仏、中)、DAQ オプションとカメラを同時制御可能 画像の撮影・保存・再生、各種画像処理、ファイル変換機能を搭載
寸法/質量	120x120x90mm/1.5Kg(突起物、付属品除く)
保管温度/湿度	-20℃～60℃/85%以下(結露無きこと)
動作温度/湿度	0℃～40℃/85%以下(結露無きこと)
標準付属品	ACアダプタ×1、ACケーブル×1、延長電源ケーブル(2m)×1、 Fマウント・Cマウントプレート×各1、マウント交換用六角レンチ×1式、 LANケーブル×1、制御ソフト PFV インストール DVD×1、マニュアル類×1式
オプション	専用ケース、動画解析ソフト、波形測定(DAQ)オプション

3.3.3.2 ボイド率測定機器

二相流動計測手法として、コンダクタンス法、触針法、超音波、レーザー（光）、X線やガンマ線などの放射線を用いた計測方法が存在するが、ワイヤメッシュセンサは高温高压条件下で計測可能であり、ワイヤ間に交流の定電圧を掛けることでワイヤ間に存在する気相と液相の電気伝導率の差を用いて断面ボイド率分布を高空間分解能かつ高速時間分解能であるため、リアルタイム計測が可能である。さらにワイヤメッシュセンサは図 3-84 のように送信側の電極層に対して受信側の電極側の電極層を送信側電極層の上下に設置させることで気泡の通過時間差から気泡界面の移動速度分布も計測可能である。以上のことから仕様に記載されている実験条件を満たすボイド率計測機器としてワイヤメッシュセンサを用いて測定する。ワイヤメッシュセンサ（図 3-85）は主にセンサ部とコントローラー部で構成されており、電気系統図を図 3-86 に示す。仕様記入項目として流体速度(max)を決める必要があったため、図 3-87 のような予備実験を行い、気液二相流の流れ場の計測を行った。実験結果を図 3-88 に示す。結果より流路流れ場の速度は 500mm/s 程度であることが確認された。またワイヤメッシュセンサは流路に直接ワイヤを張り巡らして計測する直接接触法であるため、導入するにあたって、図 3-89 のような予備実験を行い、ワイヤによる気泡の影響を確認した。図 3-90 によりワイヤによって気泡（気泡径 7mm）が分裂する様子が確認できた。またワイヤ格子間隔が 7.8mm 程度であれば気泡がワイヤに留まることはなかった。また次年度、気相に微粒子を混入させて実験を行うため、図 3-91 のような予備実験を行い、粒子の混入による電気伝導率の変化を確認した。予備実験の回路図を図 3-92 に示す。結果（表 3-4）としてヨウ化セシウムのみ試験部の抵抗値が低くなることが確認された。これはヨウ化セシウムが電解質であるためイオン化したことによる電気伝導性が高くなったためであると考えられる。ヨウ化セシウムをエアロゾル模擬粒子として使用した場合のボイド率計測は電気伝導率を補正する必要があることが確認された。

センサ部およびコントローラー部の仕様を以下に示す。図にセンサ部の図面を図 3-93 に示す。

センサ部仕様

1. 64 チャンネルダブルワイヤメッシュセンサ、流路寸法は 500×500 mm であること。
2. トランスデューサ電極 64 本×1 層に対し、レシーバ電極 64 本×2 層で挟み込む構成のダブルワイヤメッシュセンサであること。
3. ワイヤ径は 0.3 mm であり、同一層上のワイヤ間隔は 7.8 mm であること。
4. トランスミッタ電極層およびレシーバ電極層の間隔は 2.0 mm であること。
5. センサは、実験装置に取り付け容易な形状と寸法であること。
6. センサは、実験に使用する水槽に漏れがない状態で接続できる構造であること。
7. 重量はセンサ部分のみで 50 kg 以下であること。
8. 運転時の最大圧力 1.5 bar、最大温度 373 K において計測可能なこと。
9. 水-空気または水-蒸気二相流動中において、気相速度 1 m/s 以下の計測が可能なこと。

10. 計測においては、導電率 $0.5 \sim 1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、粘性係数 $1 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ の水中において計測可能なこと。

コントローラー部仕様

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

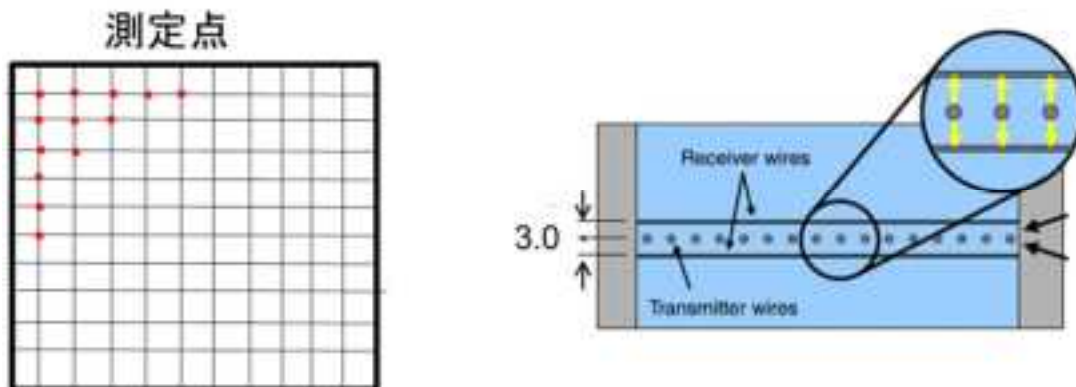


図 3-84 ワイヤメッシュセンサ概要図

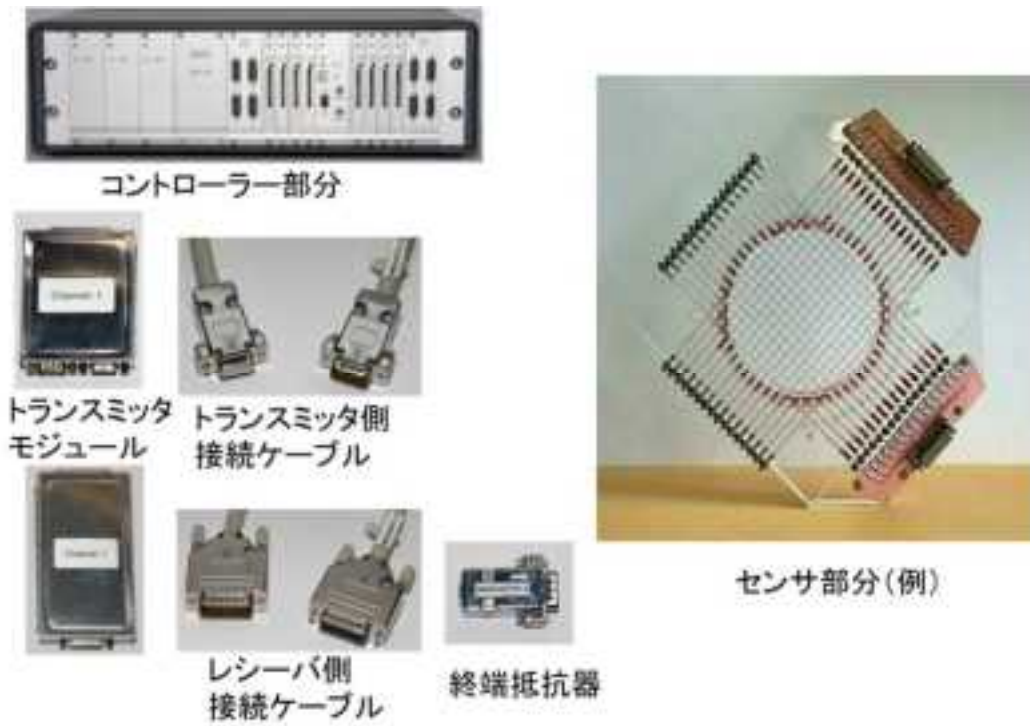


図 3-85 ワイヤメッシュセンサー式

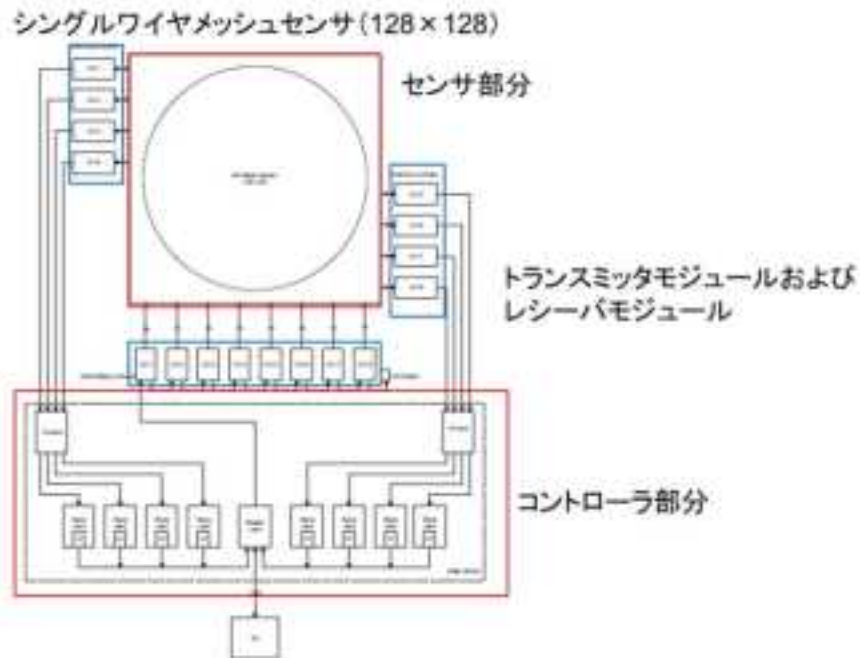


図 3-86 電気系統図

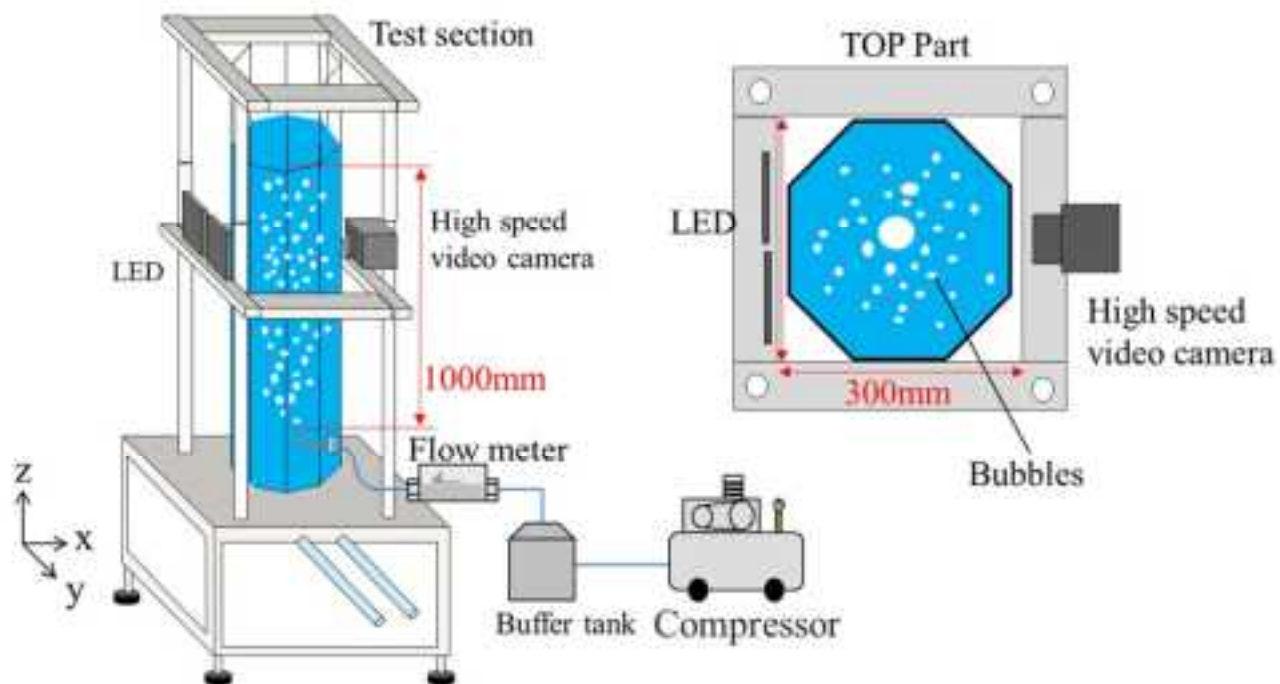


図 3-87 流れ場測定の前備実験体系

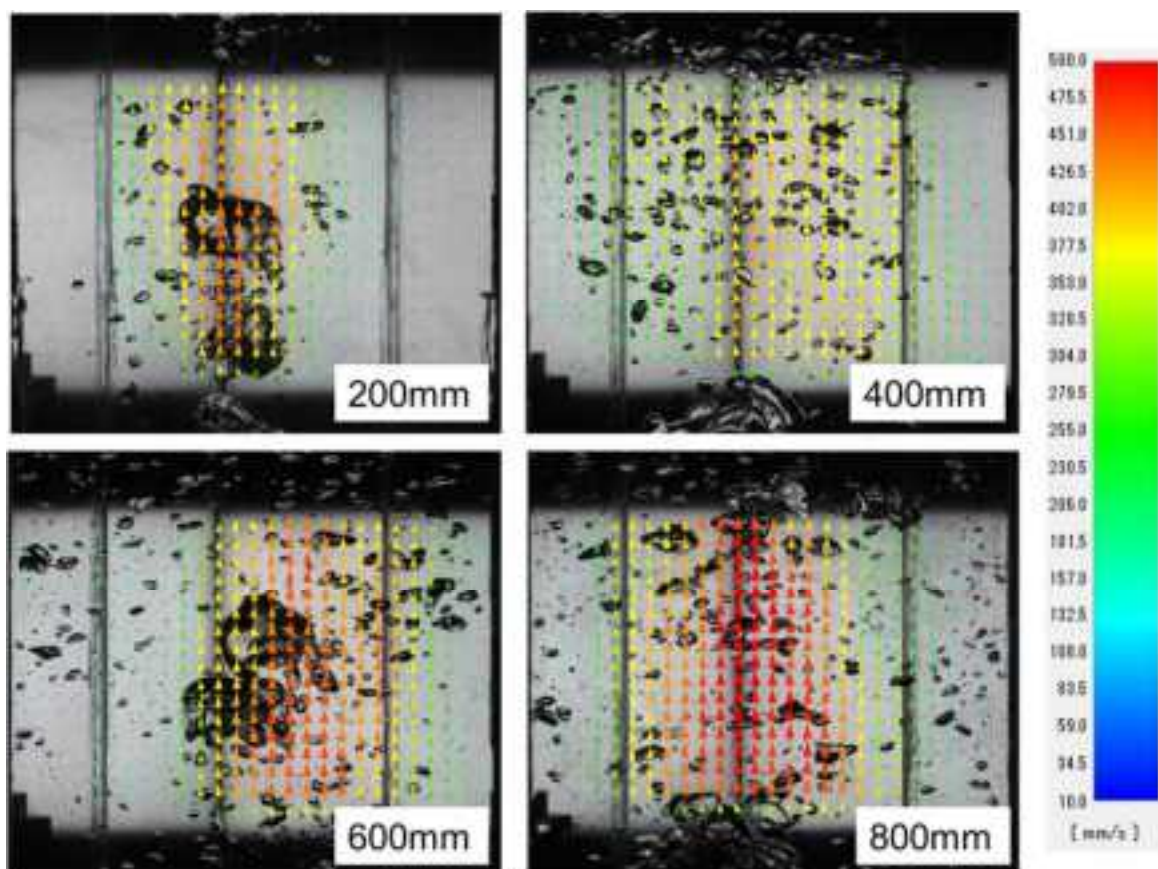


図 3-88 PIV による流れ場の測定結果

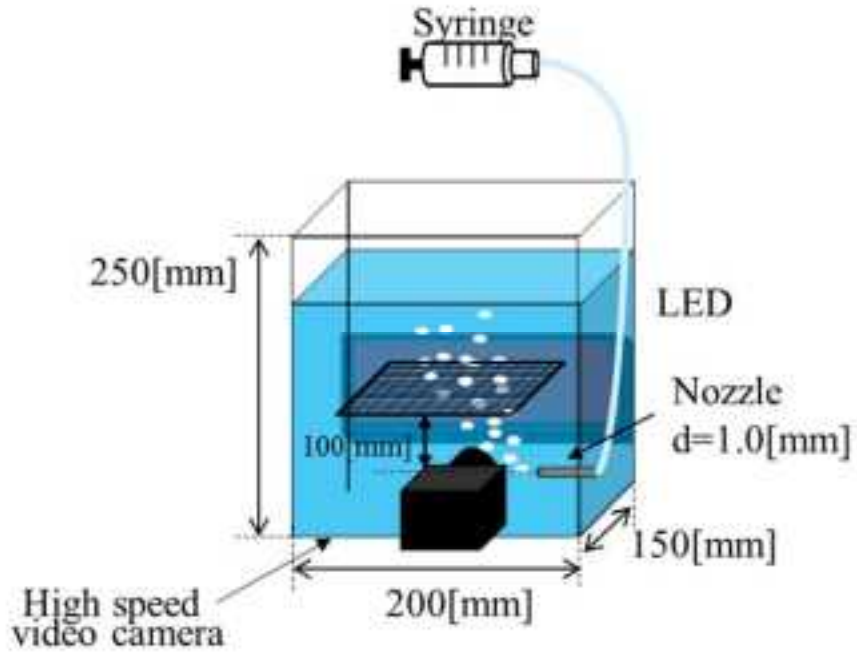


図 3-89 ワイヤによる気泡の影響確認の予備実験体系

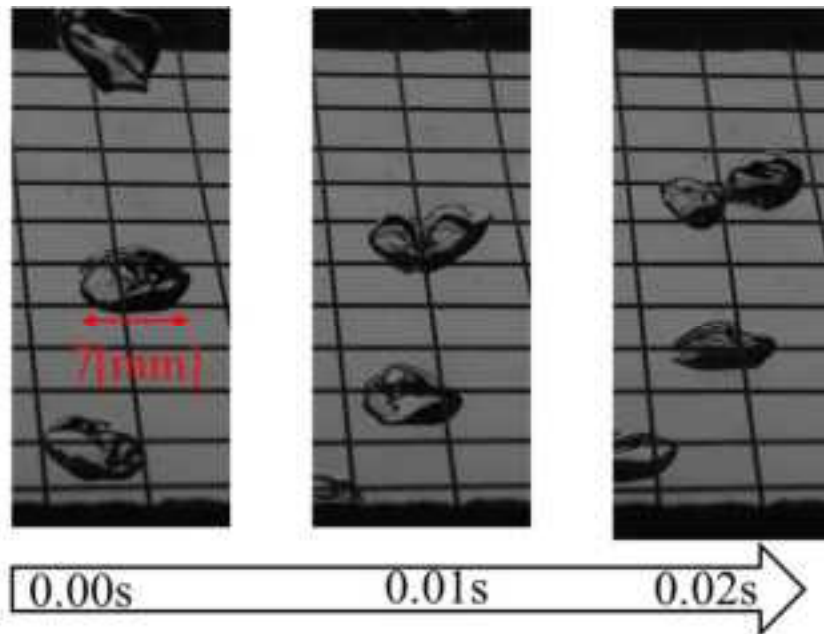


図 3-90 実験結果

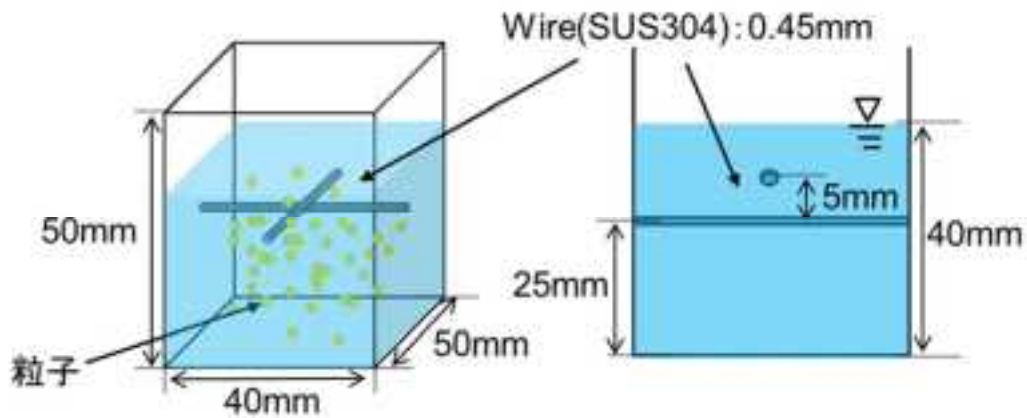


図 3-91 粒子混入による電気伝導率確認の予備実験体系

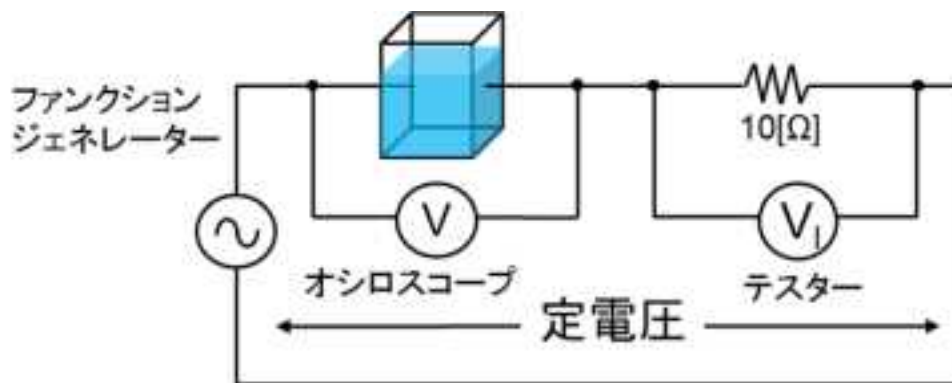


図 3-92 電気系統図

表 3-4 各粒子の試験部抵抗値

粒子名	試験部電圧値 V_{rms} [V]	電流値 I [mA]	試験部抵抗値[Ω]
なし(水道水のみ)	0.59	0.730	808.2
テクポリマー	0.59	0.720	819.4
硫酸バリウム	0.57	0.717	794.9
ヨウ化セシウム	0.084	2.358	35.6
ヨードホルム	0.57	0.680	838.2
ローダミン	0.57	0.675	844.4
なし(水道水):2回目	0.56	0.693	806.6

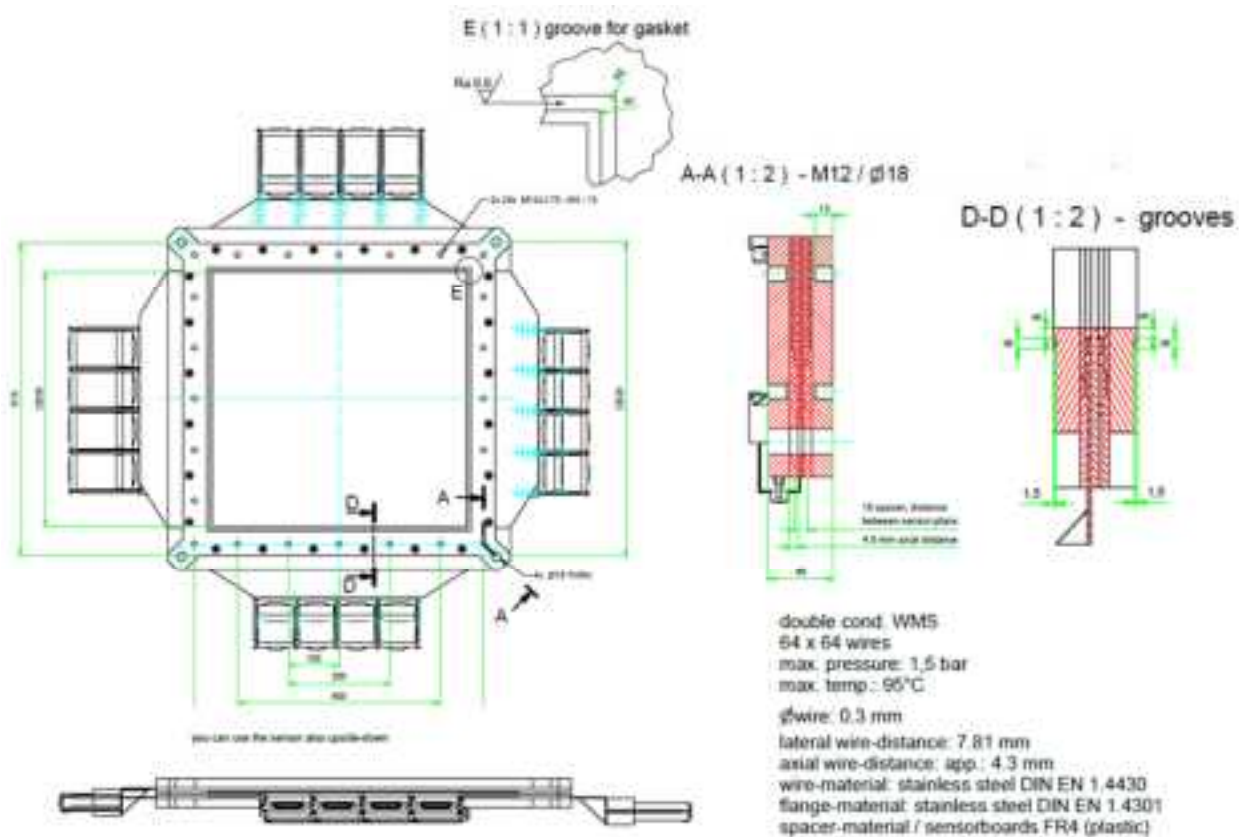


図 3-93 ワイヤメッシュセンサ 設計図

3.3.4 試験条件・作動流体・試験パラメータ

表 3-1 を参照に、試験条件は大気圧で行い、試験部容器内の液温及び気泡内の蒸気の温度範囲は常温～100℃とする。

作動流体は、水-空気（窒素）、水-蒸気、水-蒸気
（上記3条件はスケーリング特性の確認のため、水以外の作動流体も考慮可）
水-蒸気-非凝縮性ガスで行う。

試験パラメータは、ガス噴出し方向：下、横、上・とし穴形状は円（基本）、破損口形状（適宜、理想化）とする。口径は、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）用意した。ガス流出速度は単気泡相当の流速条件+ ～十分に大きな速度範囲で非凝縮性ガス濃度：0～100%まで調整可能である。エアロゾルの組成・粒径・濃度も計測方法を検討し計測を行う。サブクール度は液温が常温から飽和温度までの範囲とする（高さ方向に大きな温度勾配を設定する実験条件も含む）。サブマージェンスは 100mm 弱～2000mm 強まで試験部容器内で調整可能である。
する。

3.3.5 計測項目

- ・気泡の径、形状及び流速の分布
- ・気泡塊（クラスタ又はプルーム）の平均上昇速度
- ・ボイド率分布
- ・界面積濃度
- ・界面又は液面から発生する液滴の径及び速度の分布
- ・2 相流流動様式の特定制及び合体・分裂挙動の把握のための可視化情報
- ・液温及び気相温度（実験装置内で複数点、大まかな空間分布）
- ・液相内で温度成層を形成させる場合には、高さ方向の液温温度分布（詳細分布）

3.3.6 試験データの整理

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

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。

3.3.6.1 気泡の径、形状及び流速の分布

LED ライトと高速度カメラを用いたバックライト法により上昇気泡群を可視化観測し、

取得した画像から気泡径および形状また気泡の上昇速度を取得した。実験条件としては可視化可能な上限である 8.5L/min, ノズル内径 3mm, サブマージェンス 1000mm としてノズル先端を 0mm として 200mm ごとに可視化撮影を行った。実験結果を図 3-94 に示す。ノズル出口付近においては気相の噴出は間欠的であり、円錐形状の気泡が生成される様子が確認された。ノズルから生成された円錐形状の気泡に画像処理を行うことで気相の体積を計測した結果、67801mm³であることが確認された。またノズル先端から 200mm ごとの可視化画像より気泡径（長軸，短軸）を気泡の輪郭を 5 点プロットすることで計測した。アスペクト比の定義は図 3-95 に示す。気泡が重なっている場合も目視で判断できる気泡については処理対象とした。なお気泡の重なりが激しい場合や、解像度が 0.196mm/pix であるため直径 0.2mm 以下の気泡については除外した。対象とした画像（図 3-96）はノズル先端 800mm 地点での画像で、図 3-97 のように 512 個の気泡を処理した。高さ毎の気泡径分布を図 3-98 に示す。グラフよりどの高さ位置においても対数正規分布でフィッティングできることが確認された。また図 3-99 より、気泡数は計測位置が高くなるほど多くなることが確認できた。しかし現状として気泡の輪郭を 5 点プロットすることによって計測していることによる誤差が存在するため、今後、画像処理の自動化および精度の向上をはかる必要がある。

またノズル先端から 800mm 地点での計測値を MELCOR の計算式および Wellek の実験式より比較した。図 3-100 より MELCOR 計算式と Wellek の実験式は径が小さい場合にはある程度一致しているが、径が大きくなるにつれて実験式の方が扁平方向に推移することが分かる。また計算式および実験式より計測値のほうが全体的により扁平方向へ推移する傾向が見られた。

次にノズル先端から 800mm 付近において上昇気泡群中の一つの気泡の局所的な上昇速度を計測した。方法としては可視化動画より、ランダムに気泡を一つ選択し、その気泡の輝度重心を追跡することで高さ方向の速度を計測した。例として気泡径 4.2mm の気泡と 10.2mm の気泡の上昇速度の計測結果を図 3-101 図 3-102 に示す。グラフにおいてノイズのような評価になっている原因としては、対象の気泡を追跡する過程で周囲に存在する小さな気泡の重なりにより面積を過大評価していることが考えられる。実験結果として得られた各気泡径に対する上昇速度と MELCOR の計算式を比較した。図 3-103 より計算式より、計測値の方が先に立ち上がるような傾向が見られた。

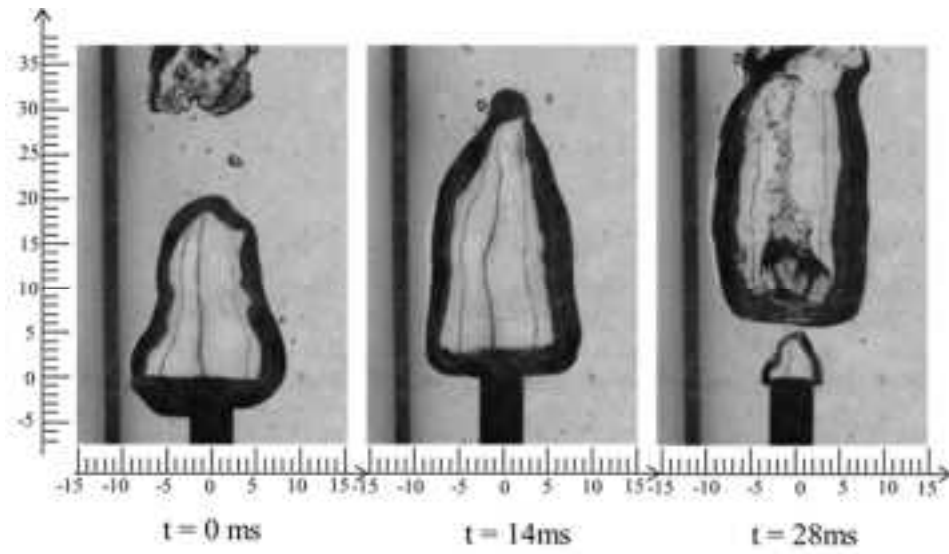
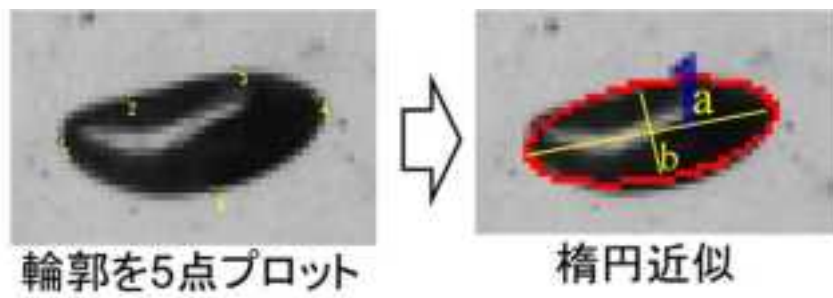


図 3-94 ノズル出口付近における気泡挙動



$$\text{アスペクト比} = \frac{a(\text{長軸})}{b(\text{短軸})}$$

図 3-95 アスペクト比の定義



图 3-96 对象画像

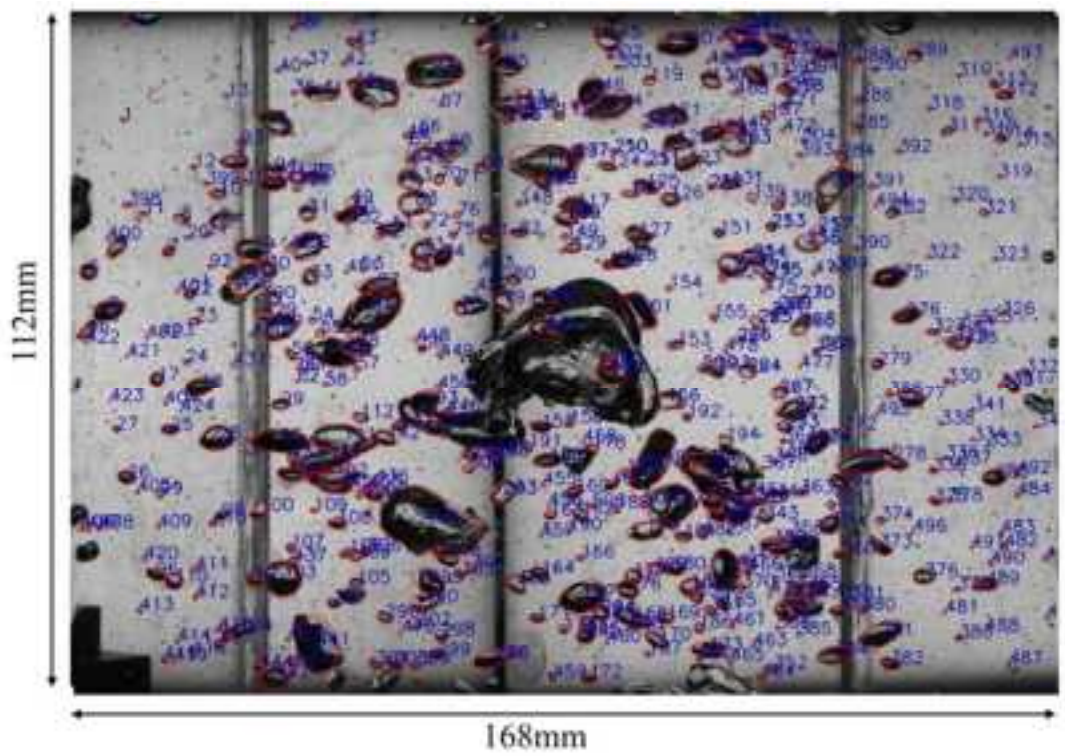


图 3-97 算出画像

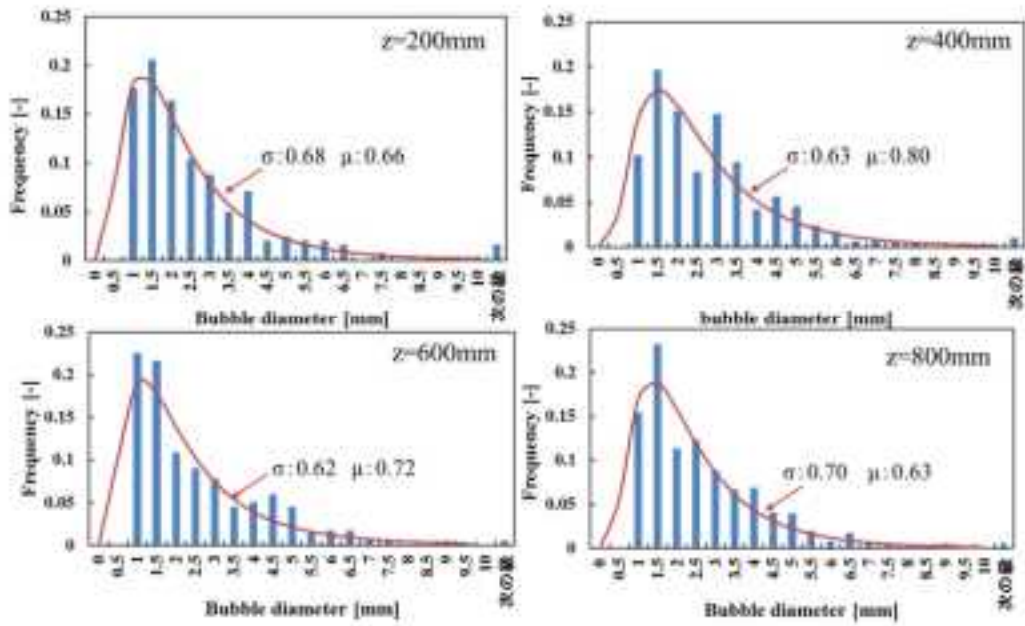


図 3-98 気泡径分布

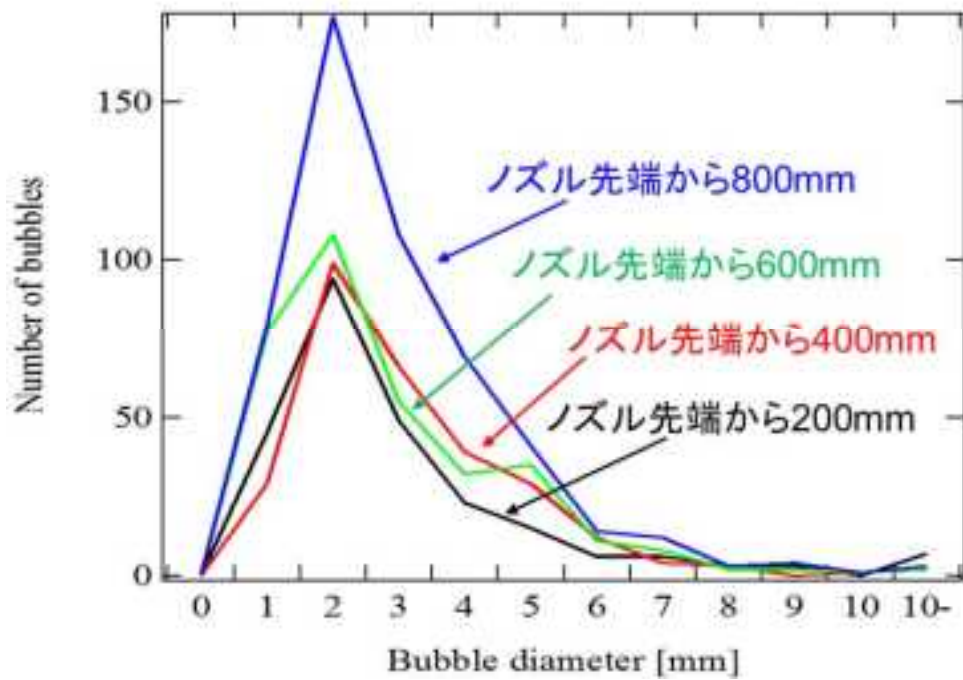


図 3-99 高さによる気泡数の変化

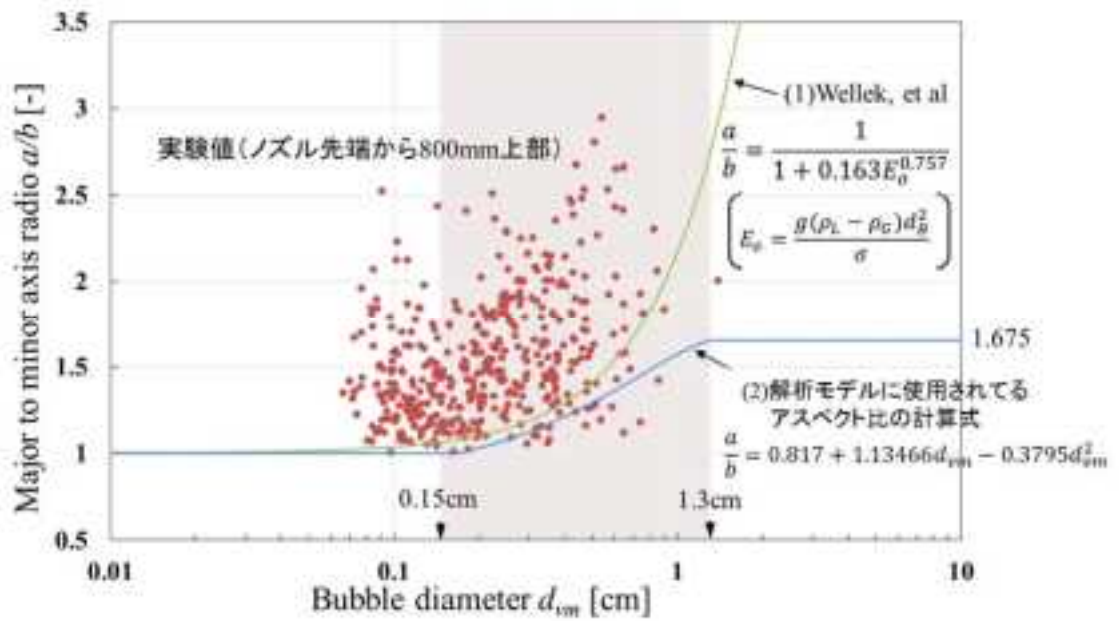


図 3-100 気泡アスペクト比と MELOCR 計算式との比較

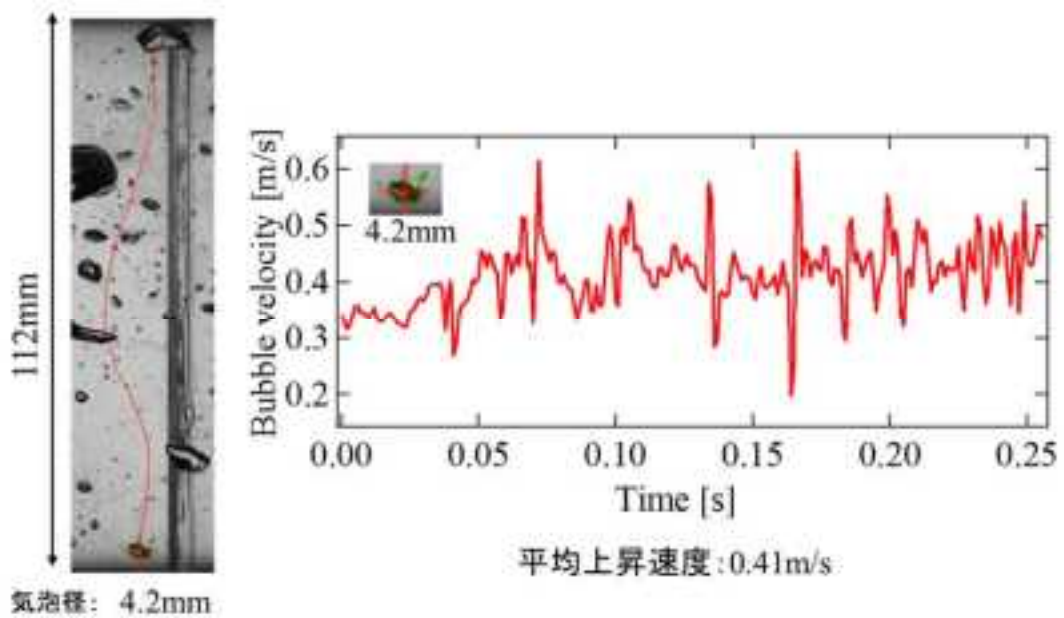


図 3-101 4.2mm 気泡の上昇速度計測結果

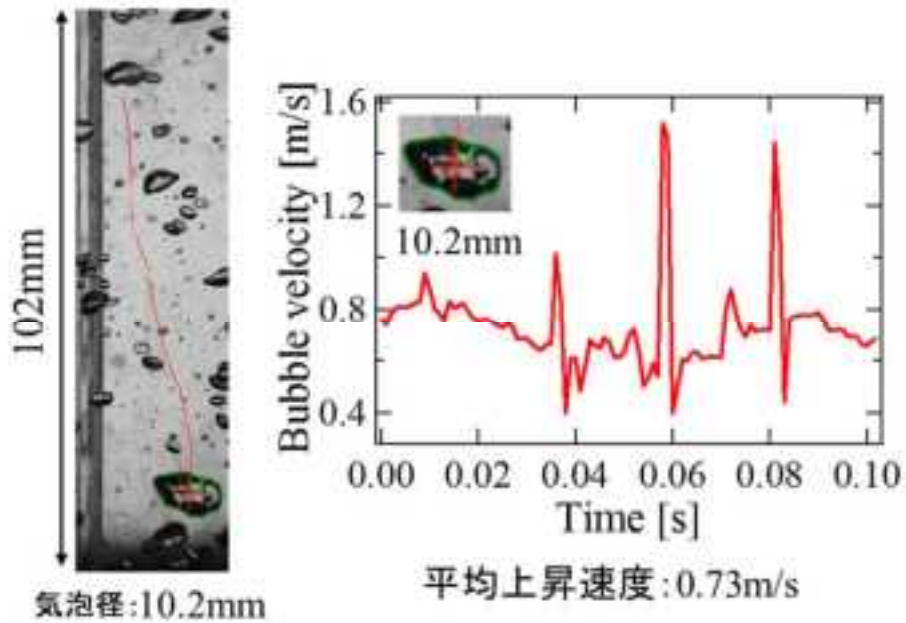


図 3-102 10.2mm 気泡の上昇速度計測結果

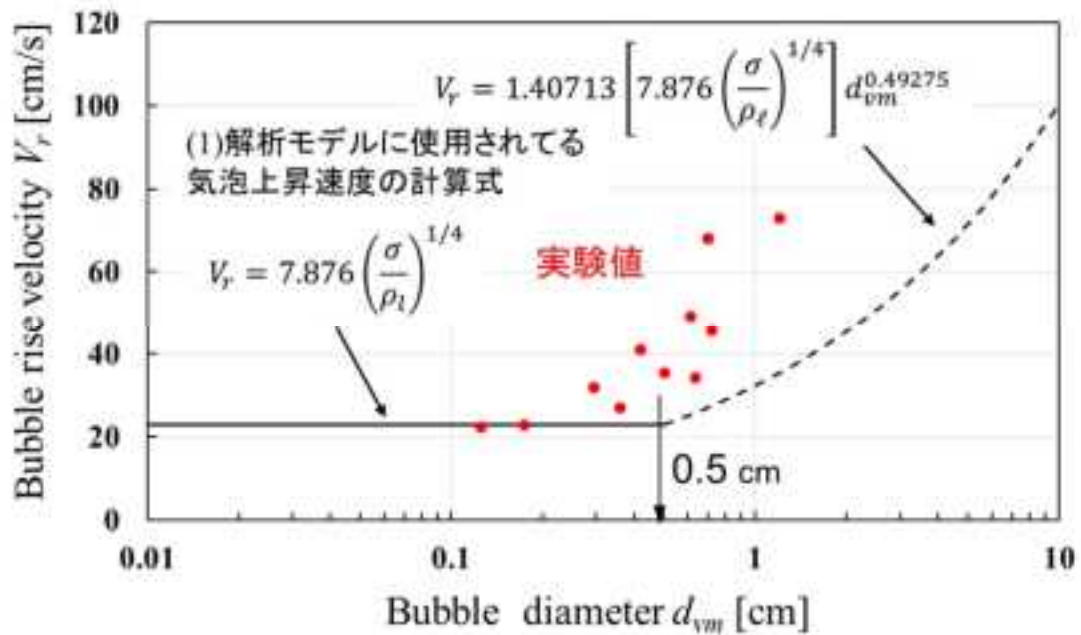


図 3-103 気泡上昇速度と MELCOR 計算式の比較

3.3.6.2 気泡塊（クラスタ又はブルーム）の平均上昇速度*要開発項目

画像よりピクセル数から気泡塊の移動距離を測定し高速カメラの撮影速度から気泡塊の上昇速度の算出し、速度を計測する。なお、可視化画像より速度を求める際、面積重心位置を追跡することが困難であるため、気泡の先端位置の移動距離を計測することで速度を算出する方法を考えている。図 3-104 より予備的に気泡塊の上昇速度を算出した結果、0.97m/s となった。今後ワイヤメッシュセンサによる気泡塊の上昇速度計測や、画像処理の自動化および精度の向上など多方面から検討する。

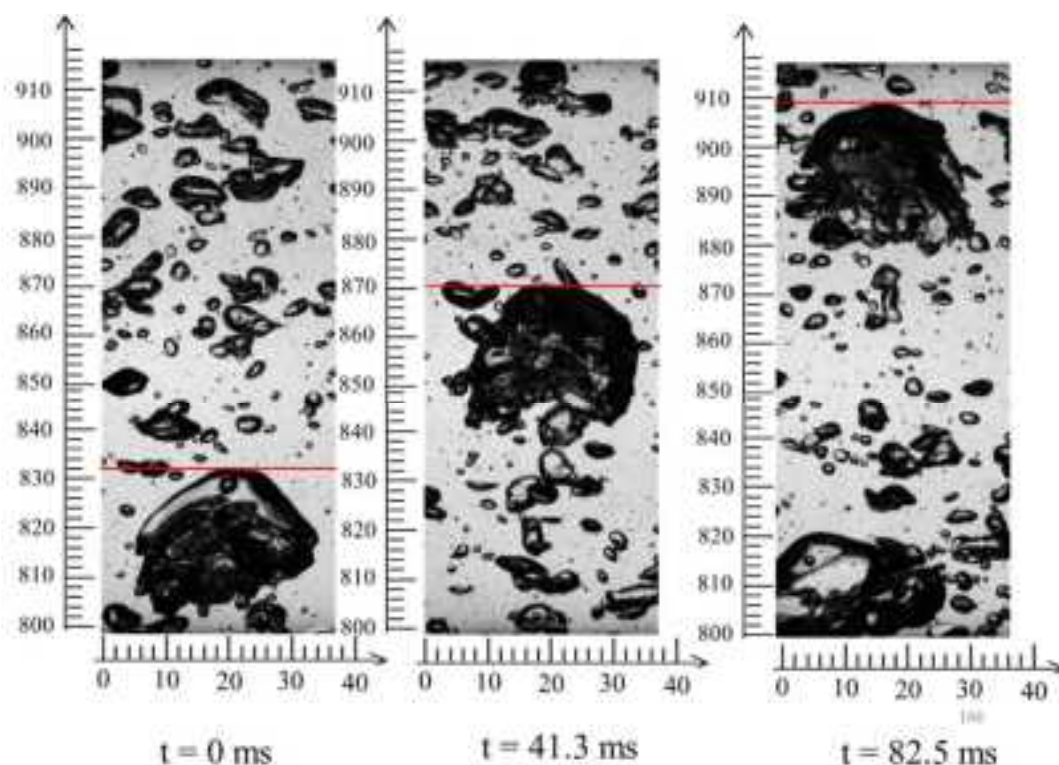


図 3-104 気泡塊の上昇速度の試算

3.3.6.3 ボイド率分布*要開発項目

3.3.6.4 界面積濃度*要開発項目

ボイド率分布および界面積濃度については要開発項目とする。ワイヤメッシュセンサを用いての計測を検討している。ワイヤメッシュセンサは高温高圧条件下で計測可能であり、ワイヤ間に交流の定電圧を掛けることでワイヤ間に存在する気相と液相の電気伝導率の差を用いて断面ボイド率分布を高空間分解能かつ高速時間分解能で計測可能である。さらにワイヤメッシュセンサは送信側の電極層に対して受信側の電極側の電極層を送信側電極層の上下に設置させることで気泡の通過時間差から気泡界面の移動速度分布も計測可能である。以上のことから仕様に記載されている実験条件を満たすボイド率計測機器としてワイヤメッシュセンサを用いて測定する。

3.3.6.5 界面又は液面から発生する液滴の径及び速度の分布*要開発項目

LED をバックライトとし，界面又は液面から発生する液滴の撮影高速度カメラを用いて行った．単一気泡の場合、水面で破裂する際の液滴飛散挙動は比較的大きな液滴が水面に対して垂直方向に飛散する様子が確認できる．単一気泡の水面での挙動を図に示す．対して気泡噴流の水面での挙動は単一気泡の場合に比べて比較的小さな液滴が様々な方向へ高速で飛散する様子が確認できる（図 3-105）．今後、画像処理を実施することで液滴径および速度の分布を計測する．

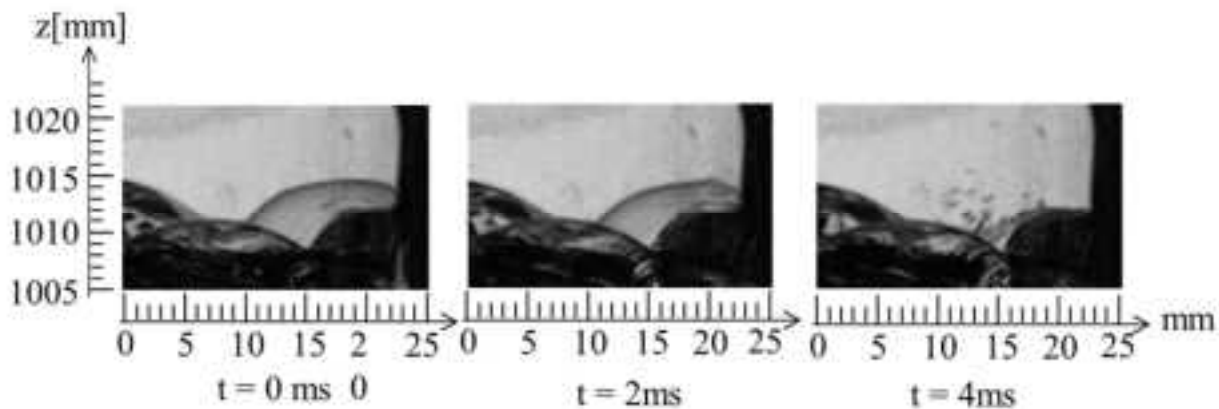


図 3-105 水面での液滴飛散挙動

3.3.6.6 気泡の 2 相流流動様式の特特定及び合体・分裂挙動の把握のための可視化情報

LED 撮影高速カメラを用いたバックライト法より気泡塊を中心とした追従撮影を行うことで 2 相流流動様式の特特定及び合体・分裂挙動の把握のための可視化情報を取得した。図 3-50 に分裂挙動例を示す。実験より気泡塊は分裂・合体を繰り返すことで細分化し、その際に小さな気泡を生成することが確認できた (図 3-106 図 3-107)。

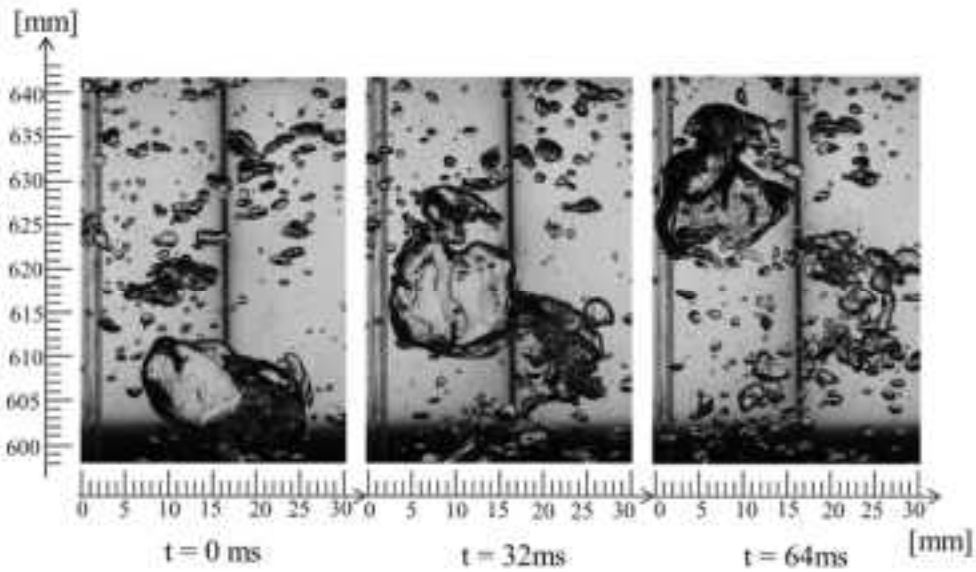


図 3-106 気泡の分裂挙動

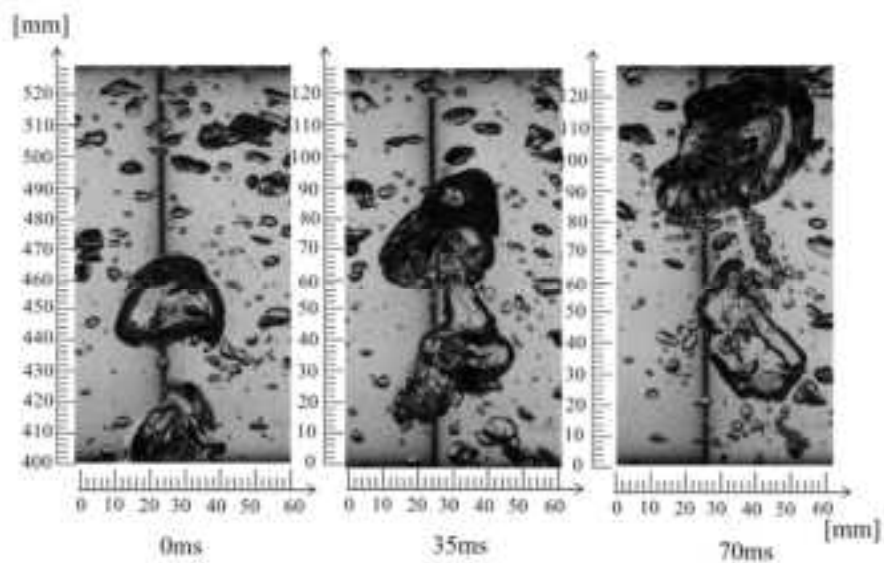


図 3-107 気泡の合体挙動

3.3.6.7 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）*
要開発項目

3.3.6.8 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）*要開発項目

試験容器内に熱電対を設置し液温を測る。気相温度はサーモグラフィを用いて測る。
液相内で温度成層化を形成させる場合には、高さ方向の液温温度分布が必要であるため図
3-108 に示すように、高さ方向 200mm ごとに熱電対用のポートを設けている。ポートに熱電
対を挿入することで試験部容器内の高さ方向の液温分布を測定する。なお、試験部容器内の
ポートは 200mm ごとに 14 か所、熱電対を設置可能である。

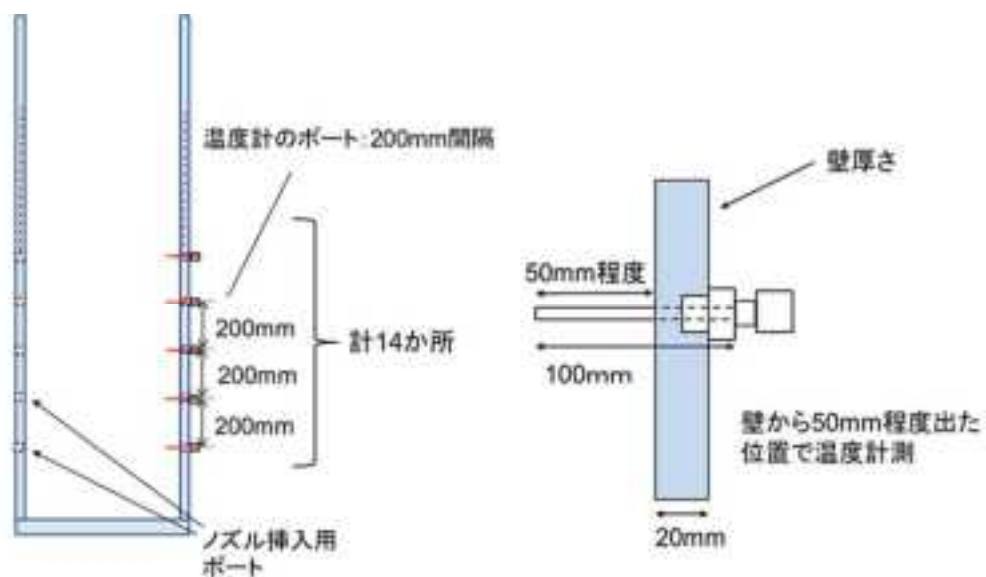


図 3-108 熱電対設置箇所

3.3.7 まとめ

気泡の 2 相流挙動評価実験装置の設計・製作及び試験を行った。装置の設計・製作および計測システムの構築について以下を実施した。

実験装置の設計・製作

- ・試験を行う水槽を製作した。
- ・水槽およびワイヤメッシュセンサをそれぞれ個別で支持する架台を製作した。
- ・レーザー、LED および高速度カメラを任意の高さで固定する計測可動部を製作した

計測システムの構築

- ・可視化観測可能な試験部容器を構築した。
- ・ノズル位置と水位を変化させることで相対的にワイヤメッシュセンサの測定位置変化させるシステムを構築した。
- ・電気温水器を設置し温度成層化を実現するシステムを構築した。

実験データの取得

予備試験より以下の実験結果の取得を行った

- ・ノズル出口付近における気相噴流の初期気泡形成時を可視化し画像処理を実施することで気相の形状および体積のデータを取得した。
- ・上昇気泡群を可視化撮影し、気泡の径および上昇速度を計測した。また MELCOR の計算式と比較を行った。
- ・気泡塊を追従撮影することによって気泡の分裂・合体挙動を確認した。
- ・界面又は液面から発生する液滴の可視化観測を行い、生成した液滴の飛散挙動を確認した

3.4 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、温度成層を模擬するための適用性について、DF評価により確認する。なお、解析ケースは代表的な試験条件で5ケース程度とした。解析を実施する試験条件は表 3-5 で明示している。

3.4.1 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 3-109 に示すように、径の違いによる質量分布を持つものとして扱われる。このため、プールスクラビングによる全体の除染係数である $DF_{OV,part}$ は次式から求まる。

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

また、 $DF_{OV,i}$ はベント管出口領域においては拡散泳動および蒸気の蒸発・凝縮による DF_{EC} 、慣性衝突による $DF_{II,i}$ 、遠心拡散・重力沈降による $DF_{ER,i}$ およびスウォーム流上昇領域においては遠心拡散およびブラウン拡散による $DF_{SR,i}$ により求まる。この詳細については 3.4.2 および 3.4.3 にて後述する。

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

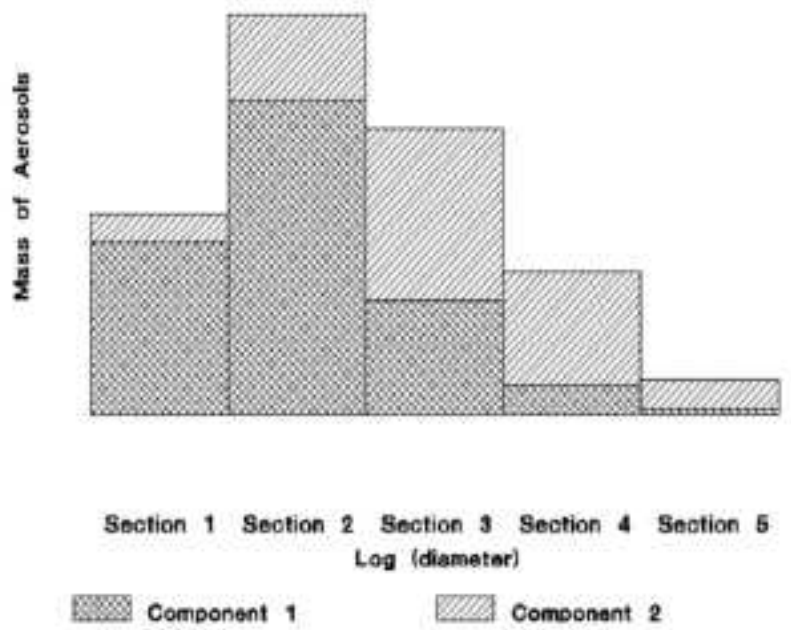


図 3-109 エアロゾルの質量分布 [1]

3.4.2 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 3-110 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 3-111 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。

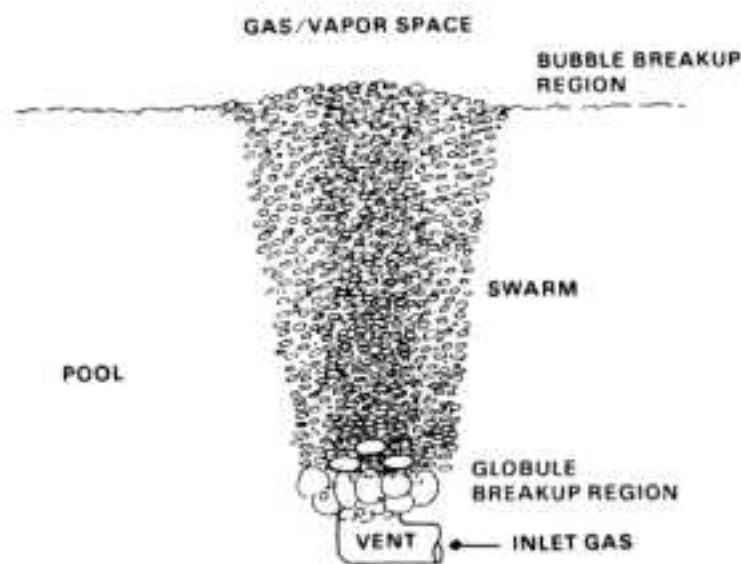


図 3-110 SPARC-90 における流動モデル

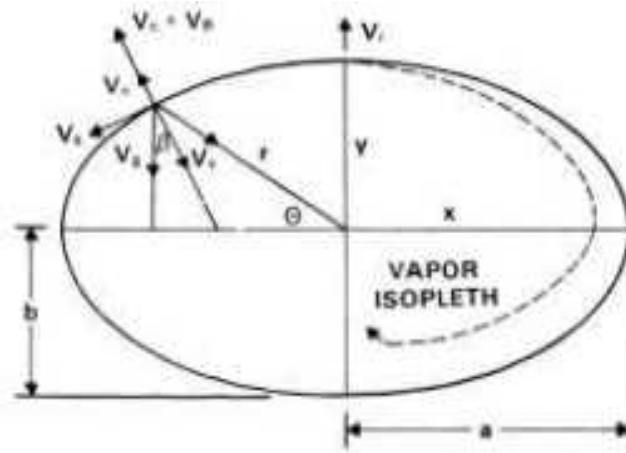


図 3-111 SPARC-90 における気泡モデル

3.4.3 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 3-112 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 $DF_{I,i}$ 、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。

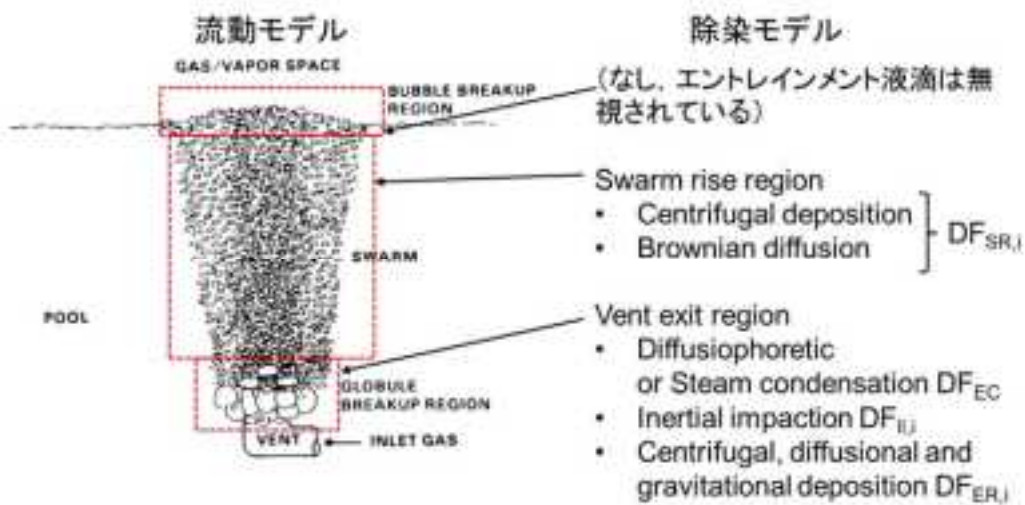


図 3-112 SPARC-90 における除染モデル

3.4.4 温度成層解析体系の検討

温度成層が形成されたプール内において、プールスクラビングによる除染効果を検討するため、温度成層を模擬した解析に対する MELCOR の適用性の確認と、どのような解析挙動を示すか確認を行う。

温度成層は、一つのプール内で高温層と低温層に分かれた状態であるが、MELCOR では一つのコントロールボリュームにおいて温度の異なる複数の層を表現できない。よって二つ以上のコントロールボリュームを用いる必要がある。しかし、一つのプールを複数のコントロールボリュームで表現する場合、コントロールボリューム間のフローパスによる接続をどのようにするかによって、解析結果が変わる可能性がある。

よって本研究では温度成層を模擬した解析を実施するため、複数の解析体系を構築し、解析を実施することでその適用性について検討する。そのため、まずは一つのプールを上下に分けて、二つのコントロールボリュームで表現することとする。解析体系は、節点数と接続方法を組み合わせて複数検討する。具体的には、プールを一つのコントロールボリューム（1 節点）とした場合と二つ（2 節点）とした場合を比較し、コントロールボリュームの数による影響を確認する。続いて接続を、上側プールの下端と下側プールの上端とする場合と、上下プールのそれぞれ中間の高さ位置とする場合に分けて解析を実施する。まず上下プールともに常温で解析した後、この結果を踏まえて上側プールを高温、下側プールを低温（常温）とした場合で解析する。以上を踏まえ、温度成層を模擬した解析に対する MELCOR の適用性を確認する。

3.4.5 解析体系および解析条件

図 3-113 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結ぶフローパスにより構成されている。詳細な寸法は図に示す通りである。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 である。解析体系の主要なパラメータおよびエアロゾルの入力値を図 3-116 に示す。解析において、このノズル部の流量を調整することで実験体系と条件を一致させた。試験流体は水および空気とし、各領域内の温度、圧力は常温、常圧とした。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。解析条件を表 3.1 に示す。まず解析番号 No.1 により DF 解析の基礎的な挙動を把握した。続いて節点数の影響、接続方法の影響、温度成層の影響について検討した。

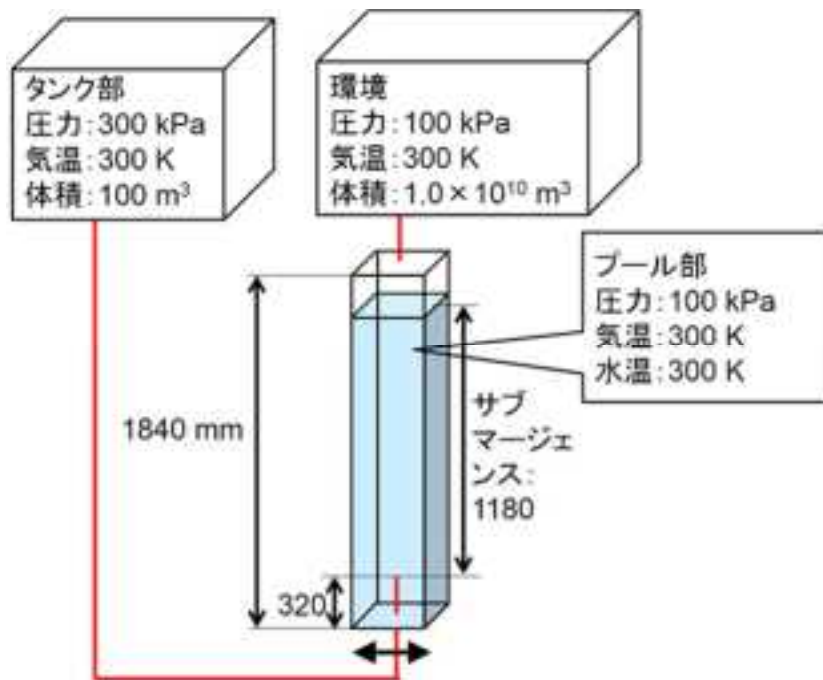


図 3-113 解析体系

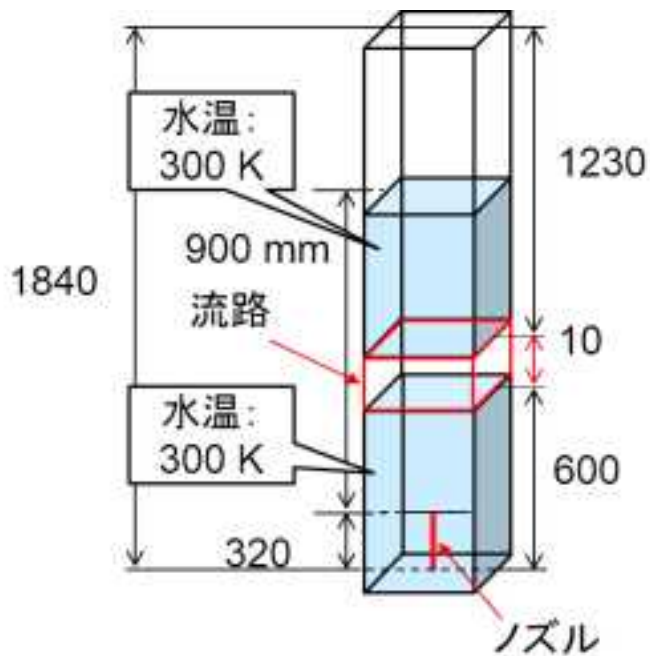


図 3-1142 節点の CV 接続方法 1

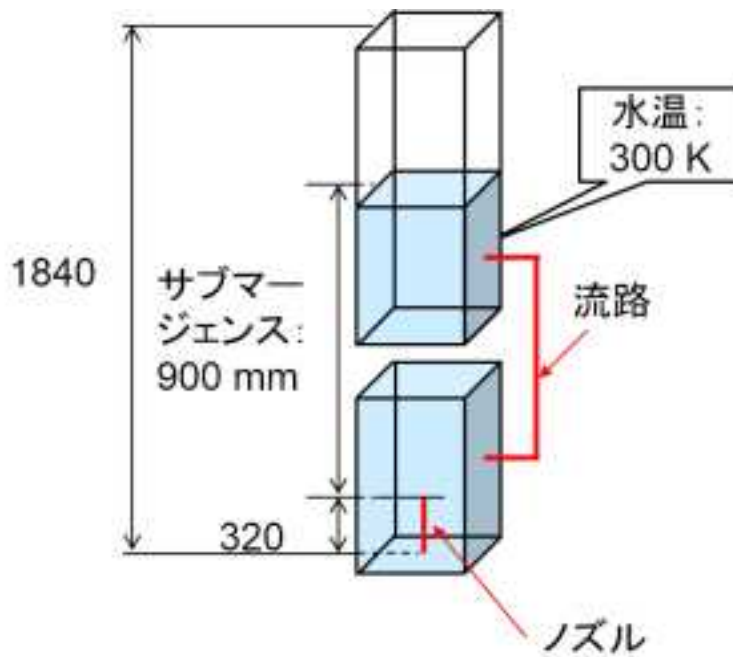


図 3-115 2 節点の CV 接続方法 2

各ボリューム主要パラメータ

	体積 [m ³]	圧力 [kPa]	気温 [K]	水温 [K]
タンク部	100	300	300	-
プール部	0.166	100	300	300
環境	1.0 × 10 ¹⁰	100	300	-

エアロゾルの入力

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

図 3-116 解析体系の主要なパラメータおよびエアロゾルの入力値

表 3-5 解析条件

番号	検証内容	試験流体	ノズル直径	ノズル部流速	体積流量	サブマージエンス	計算時間	環境の体積	プール上部の体積	CV節点数	CV間接続方法	温度	断面積
			[mm]	[m/s]	[L/min]	[mm]	[s]	[m ³]	[m ³]			[K]	[m ²]
No. 1	CV節点数の影響	空気-水	3	1	0.424	900	86400	10 ¹⁰	0.0558	1		300	0.09
No. 2	CV節点数の影響・ CV間接続方法の影響	空気-水	3	1	0.424	900	86400	10	0.0558	2	端間	300	0.09
No. 3	CV間接続方法の影響	空気-水	3	1	0.424	900	86400	10	0.0558	2	中心間	300	0.09
No. 4	CV間接続方法の影響	空気-水	3	1	0.424	900	86400	10	0.0558	2	端間	350	0.09
No. 5	CV間接続方法の影響	空気-水	3	1	0.424	900	86400	10	0.0558	2	中心間	350	0.09

3.4.6 DF に対する節点数の影響

図 3-117 に、節点数 1 を赤の実線、節点数 2 を青の実線で示す。節点数 1, 2 ともに、解析開始後すぐに DF が 0 から 1 程度に上昇し、その後は変わらなかった。落ち着いた後の DF は、節点数 1 と 2 では 1.2 倍程度の違いがあり、節点数 1 に比べて 2 の方が DF を大きく評価することが分かった。

これは、節点数を増やしたことで、ガスがノズルから噴出する際の DF を計算する機会が増えたためだと考えられる。MELCOR では、まずノズルからガスが出た状況を想定して、慣性衝突のモデル等により DF を求め、また別途、上昇気泡中の DF を求める。上昇気泡中の DF はサブマージェンスが重要であるため本解析では節点数が異なっても合計のサブマージェンスは同じ程度としている。このため、上昇気泡中の DF を求める過程における違いは考えにくい。対して、ノズルからガスが噴出する過程での DF の計算の機会、節点数に比例する。この違いによって節点数が多いと DF が大きくなると考えられる。

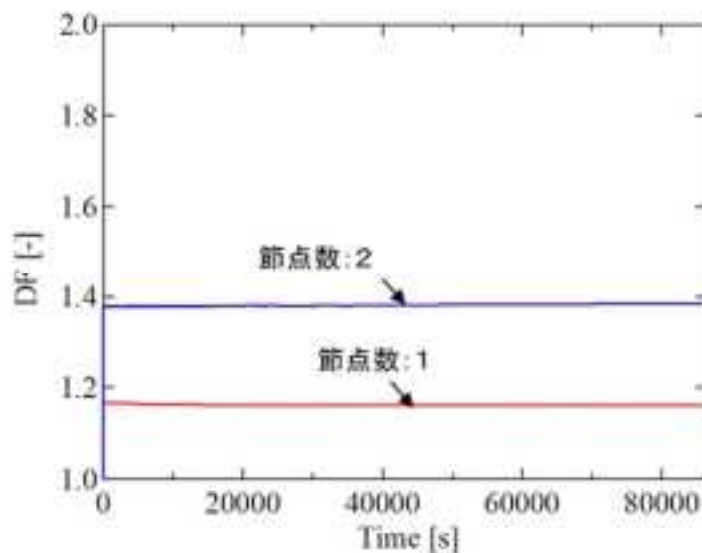


図 3-117 MELCOR による DF に対する節点数の影響

3.4.7 DF に対する CV 間接続方法の影響

図 3-118 に、プールを二つのコントロールボリュームで表現し、上側プールの下端、下側プールの上端を接続した場合と、上下プールのそれぞれ中央の高さで接続した場合の結果を示す。赤の実線が上端下端を示し、青の実線が中心間を示す。上端下端は解析開始後すぐに DF が 0 から 1 程度に上昇し、その後は変わらなかった。中心間は、同様に 0 から 1 程度へ上昇した後、値が下降し、一定となった。上端下端と中心間は 1.06 倍程度の違いがあることが分かった。これは、接続したフローパスの高さ位置の影響が考えられる。MELCOR において DF の計算は、除染の計算の用いられるサブマージェンスを、ガスが流入するノズル出口から水面までの区間としており、この計算の後、コントロールボリューム内のエアロゾル質量などが更新される。このことから、下側のプールではサブマージェンスが同じであるため同じ DF の値が出力され、上側のプールでは中心間の場合のほうがサブマージェンスは短くなり比較的lowめの DF が出力されると考えられる。このため、図 3-118 のようにプール全体の DF では上端下端よりも中心間の場合で低く出力されたと考えられる。

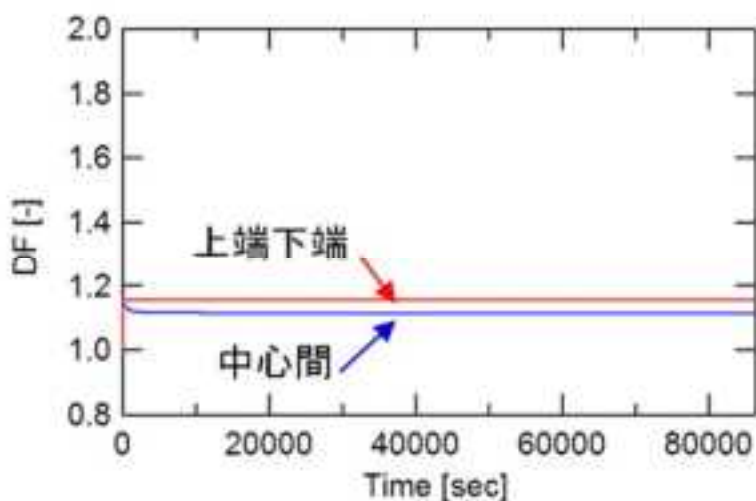


図 3-118 DF に対する CV 間接続方法の影響

3.4.8 温度成層を模擬した場合の DF に対する CV 間接続方法の影響(上部下端下部上端)

中心間接続の解析体系を用いて，上側プールを高温にすることにより温度成層を模擬した結果を図 3-119 に示す．赤の実線で上側プールを高温にした結果を，青の実線で上側プールを常温にしたままの結果を示す．両者の値は一致しており，この解析体系においては温度成層の影響がないことが確認された．

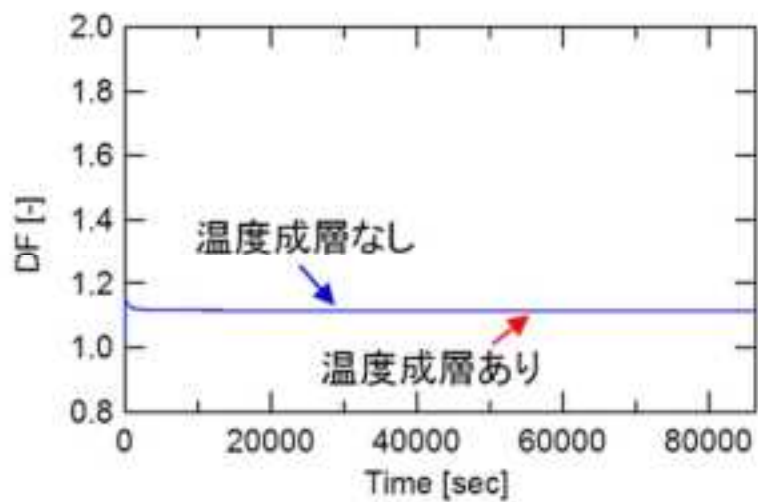


図 3-119 DF に対する温度成層模擬の影響

3.4.9 温度成層を模擬した場合の DF に対する CV 間接続方法の影響（中心間）

上側プールを高温にすることにより温度成層を模擬した結果を図 3-120 に示す。上側プールを高温にすることで温度成層を模擬した結果を図 3-119 に示す。赤の実線で上端下端の結果を、青の実線で中心間の結果を示す。上端下端接続の場合、解析開始後、急激に DF1.5 まで立ち上がった後、緩やかに値が小さくなり、40,000 秒の前 DF1.2t 程度まで下降した。この特徴的な挙動の原因を確認するため、に温度の結果を示す。で上側プールの下端と下側プールの上端を接続した場合の結果を示す。赤の実線は上端下端の場合の下側プールの水温、赤の点線は上側プールである。青の実線は中心間の場合の下側プールであり、青の点線は上側プールである。上端下端の場合、40,000 前までは上側、下側で温度に 40~50℃程度差があるが、以降は同じ温度になっている。これは温度成層が 40,000 秒前を境に維持できなくなり、解消されたためと考えられる。対して中心間の場合、上側のプールの温度が解析開始直後に 10℃程度下がるものの、以降は緩やかに温度が低下している。この接続方法による温度変化の違いが、DF に表れていると考えられる。どちらの接続方法が適切かを検討するには、温度成層がどの程度の時間で消失するか見積もり、解析結果と比較して判断する必要がある。

以上のことから、MELCOR において温度成層を模擬した解析を実施する場合、解析体系を 2 節点とすることで、温度成層による DF への影響を加味できると言える。ただし、ノズルからガスを噴出する機会が増えるなど、MELCOR 中でどのような現象を含んだ計算が行われているか十分に把握して解析体系を構築する必要がある。

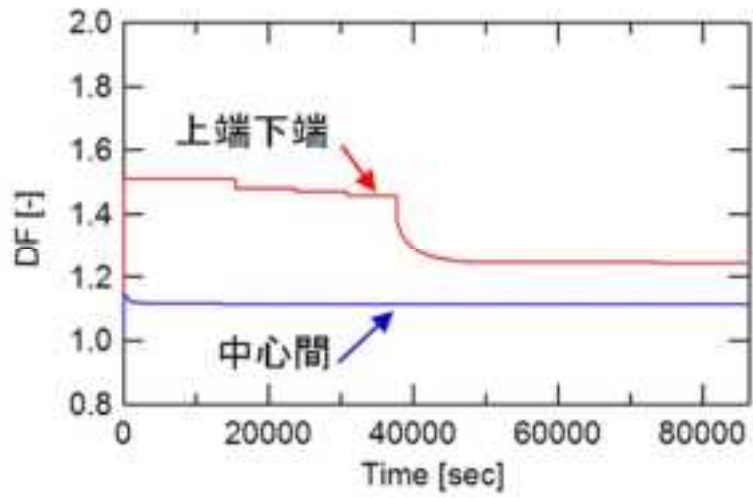


図 3-120 温度成層を模擬した場合の DF に対する CV 間接続方法の影響

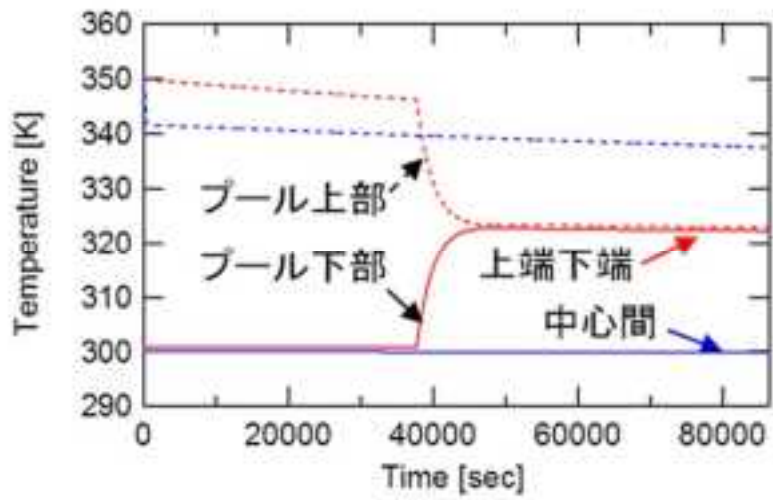


図 3-121 温度成層を模擬した場合の温度に対する CV 間接続方法の影響

3.4.10 まとめ

MELCOR を用いた解析を実施し、以下の知見を得た。

- 複数の解析体系での解析を比較することで、MELCOR を用いた温度成層を模擬した解析の適用性について検討した。
- プールを区切る数の違いは DF に影響することを確認した。区切る数が多くなるにつれてフローパスが設けられるため、ノズル出口を想定した DF 評価をする機会が増えること要因の一つに考えられる。
- プール同士の接続方法の違いは DF に影響することを確認した。
- 温度成層を模擬する場合、プール水の温度は DF に影響することを確認した。

文献目録

- [1] MELCOR Computer code manuals(1.8.5), NUREG/CR-6119.
- [2] P. C. Owczarski, “SPARC-90: A code for calculation fission product capture in supression pools,” NUREG/CR--5765, 1991.
- [3] N. A. Fuches, The mechanics of aerosols, Pergamon Press, 1964.
- [4] W. E. Ranz , J. B. Wong, “Impaction of dust and smoke particles,” Ind. Eng. Chem., 1952.
- [5] M. E. Berzal, M. J. M. Crespo, M. Swiderska-Kowaiczuk, M. M. Esougaes , J. L. Jimenez, “State-of-the-art review on fission products aerosol pool scrubbing under severe accident conditions,” EUR 16241, 1995.
- [6] 南 茂夫, 科学計測のための波形データ処理, CQ 出版社, 1986.

