

平成 29 年度原子力規制庁委託成果報告書

スぺーサ影響評価試験

一般財団法人 電力中央研究所
原子力技術研究所
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. 緒言（背景と目的）	1
2. 実験装置	2
2.1. 実験設備	2
2.1.1. 体系全体	2
2.1.2. テスト部	2
2.1.3. 空気流供給部	2
2.1.4. 液滴射出部	2
2.1.5. 模擬スペーサ	3
2.2. 計測系	3
2.2.1. 空気流計測	3
2.2.2. 液膜計測	3
2.2.3. 液滴計測	4
2.3. 作動流体	4
3. 実験の実施	22
3.1. 実験条件	22
3.1.1. 空気流計測	22
3.1.2. 液膜計測	22
3.1.3. 液滴計測	22
3.2. 実験方法	23
3.2.1. 空気流計測	23
3.2.2. 液膜計測	23
3.2.3. 液滴計測	24
3.3. 実験結果	24
3.3.1. 空気流計測	24
3.3.2. 液膜計測	25
3.3.3. 液滴計測	26
3.4. 分析・考察	26
4. 結言	116

表目次

表 2-1	スペーサ影響評価試験の基本仕様.....	6
表 2-2	空気流計測システムの主要構成.....	7
表 2-3	液膜計測センサの基本仕様.....	8
表 2-4	液滴計測システムの主要構成.....	9
表 3-1	空気流計測ケース.....	28
表 3-2	液膜計測ケース.....	29
表 3-3	液滴計測ケース.....	30
表 3-4	空気流計測に必要な設定項目.....	31
表 3-5	液膜計測に必要な設定項目.....	32
表 3-6	液滴計測に必要な設定項目.....	33

図目次

図 2-1	実験設備体系の全体概要.....	10
図 2-2	テスト部.....	11
図 2-3	テスト部流路.....	12
図 2-4	空気流供給部.....	13
図 2-5	液滴射出部.....	14
図 2-6	模擬スペーサ.....	15
図 2-7	空気流計測：各ハード機器の配置.....	16
図 2-8	空気流計測：解析ソフトウェアのユーザーインターフェース.....	17
図 2-9	液膜センサの主要構成と寸法.....	18
図 2-10	WMS200 のユーザーインターフェース.....	19
図 2-11	液滴計測：各ハード機器の配置.....	20
図 2-12	液滴計測：解析ソフトウェアのユーザーインターフェース.....	21
図 3-1	空気流計測方法.....	34
図 3-2	液滴計測方法.....	35
図 3-3	空気流計測の作業フロー.....	36
図 3-4	液膜計測の作業フロー.....	37
図 3-5	液滴計測の作業フロー.....	38
図 3-6	液膜センサのキャリブレーション方法.....	39
図 3-7	液膜センサのキャリブレーション曲線.....	40
図 3-8	プランジャーポンプのストロークと吐出速度の関係.....	41
図 3-9	射出される液滴径と液滴数の関係.....	42
図 3-10	[1/18] 実験結果（空気流計測：ケース番号 PIV-01）.....	43
図 3-11	[1/8] 実験結果（液膜計測：ケース番号 LF-01）.....	61
図 3-12	[1/8] 実験結果（液膜計測：ケース番号 LF-01）.....	69
図 3-13	実験結果（液滴計測：液滴径）.....	77

図 3-14 [1/18] 実験結果（液滴計測：ケース番号 PM-01）	78
図 3-15 [1/18] 実験結果（液滴計測：ケース番号 PM-01）	96
図 3-16 分析・考察（液滴放出量の影響）	114
図 3-17 分析・考察（サブチャンネルと空気平均流速の影響）	115

1. 緒言（背景と目的）

沸騰水型軽水炉（BWR）の炉心内で加熱された冷却材が核沸騰域から逸脱して燃料棒表面における熱伝達の悪化をもたらす沸騰遷移などの燃料集合体の除熱特性に影響を及ぼす支配因子の1つとして、燃料集合体の構成部品であるスペーサによってもたらされる効果が知られている¹⁾。

BWR 燃料集合体におけるスペーサは、全長約 3.7m に対して等間隔に 7 個装着されており、燃料集合体を構成している各燃料棒に一定の間隔を保ちその間を通過する冷却材の流路を確保するための支持部品である。幾つかの種類があり、丸セル型（各燃料棒をリング状のセルで支持）、グリッド型（格子状に部材で区切りその間に燃料棒を固定）、旋回羽型（グリッド型における格子の交点部分に羽型の部材を装着）が代表的な形状である。

スペーサが除熱性能に影響を及ぼす効果は、過去の先行研究²⁾によると以下の4ターンに整理される。

- 気相流中の構造材の存在により偏流を誘起し、液膜流を阻害することにより液膜厚さが小さくなる効果
- 気相中の液滴がスペーサに衝突して飛散し、燃料被覆管表面への付着量が増加する効果
- スペーサの下流域において気相流が攪乱され、気相に随伴して流れている液滴の燃料被覆管表面への付着量（デポジション）が増加する効果
- スペーサの下流側において気相流が攪乱され、燃料被覆管表面を流れる液膜から一部流体が液滴として剥ぎ取られる（エントレインメント）効果

こうした各因子の素過程を機構論的にモデル化し、CFD 等の解析による予測精度の向上を図ることが重要であり、各種スペーサの形状および構造を網羅した時間的・空間的に高い分解能の実験データベースを蓄積することが必要である。

「原子力施設等防災対策等委託費（スペーサ影響評価試験）事業」（以下“この事業”という。）では、スペーサが有する燃料集合体の除熱性能に資する効果のうち、特にスペーサ下流域での液滴付着効果に焦点を当て、そのメカニズムの解明とモデル化を目指して試験を実施することとしている。

1年目の昨年度は、BWR 燃料集合体内の代表的なサブチャンネルを模擬した流路構成のテスト部を有する試験装置を設計・製作した³⁾。

2年目にあたる本年度は、その試験装置を用いて、以下に示す業務を実施した。

- テスト部流路を流れる空気流および液滴、さらにスペーサを通過した液滴が模擬燃料棒表面に付着して形成される液膜を計測対象とし、各々の計測方法や手順から取得データの処理や加工に至る計測プロセスを体系化する。
- 体系化された計測プロセスに基づき代表タイプのスペーサを選定して液滴・液膜計測を実施し、取得データの分析を経て得られる知見を整理する。

本報告書は、この事業の具体的実施内容について記すものである。

2. 実験装置

本章では、平成 28 年度に製作された実験装置について、本年度の実験を行うにあたって新たに改良を施した部分も含め、実験設備・計測系の詳細及び実験で用いる作動流体について述べる。表 2-1 にスぺーサ影響評価試験の基本仕様を示す。

2.1. 実験設備

本節では、実験設備の体系全体の概要を述べ、実験にあたり重要な主要部位について、平成 28 年度の製作段階から改良を施したものについて特に着目して述べる。

2.1.1. 体系全体

実験設備体系の全体概要を図 2-1 に示す。テスト部入口に連結する配管系統は、作動流体である空気流の供給、液滴の供給、PIV 空気流計測（後述）のためのトレーサー粒子として用いる水噴霧流の供給、の 3 系統で構成されている。テスト部出口側は作動流体の気相（空気）と液相（液滴）を分離する容器を経て排気ダクトに連結している。

2.1.2. テスト部

実験設備の中で、模擬スぺーサを含み作動流体の計測を行うテスト部を図 2-2 に示す。下部試験流路部の底部に空気流を供給するマニホールドが付けられ、頂部には液滴を射出するノズルの固定サポートが備えられている。高さ 40mm のノズル検査用小窓付流路の上に高さ 30mm の模擬スぺーサが位置し、その上部（下流側）が計測領域となる。空気流計測・液滴計測の際には可視化を要するためアクリル製の流路を配置する。液膜計測の際には流路内壁（の燃料棒を模擬した半円部分）に多点の液膜センサを擁した基板が貼付され、流路内は不可視となる。

テスト部の流路は、図 2-3 に示すような燃料集合体を模擬したものであり、4 本の燃料棒に囲まれたセンターサブチャンネルを含む冷却材流路を模擬した「センター体系」と、2 本の燃料棒とチャンネル壁に囲まれたサイドサブチャンネルを含む冷却材流路を模擬した「サイド体系」を共有できる構造としている。

2.1.3. 空気流供給部

実験設備の中で、テスト部に空気流を供給する機構を図 2-4 に示す。空気タンクにより加圧され、減圧弁にて調整しつつ所定の流量でテスト部に供給される。テスト部にはマニホールドにより多孔板を介して流入される。

2.1.4. 液滴射出部

実験設備の中で、テスト部に液滴を射出する機構を図 2-5 に示す。下部試験流路部の頂部において液滴射出ノズルが支持され、その上流側にはプランジャーポンプが連結される。プランジャーポンプは軸方向の往復運動により流体を駆動するポンプであり、その往復運動の時間及び距離を調整することにより、周期的に水がノズルに供給される。

液滴射出ノズルは、内径 0.3mm の細管に直径 0.2mm の針金（共にステンレス製）が挿入された構成となっている。針金を挿入しないと細管内壁に対する水の表面張力が小さく射出時に液滴を形成せず飛散してしまうが、針金を挿入するとその周囲に液膜が形成され、その液膜が上部に伝って先端で液滴が形成される。針金の先端は液滴が形成されやすくなるよう尖らせる加工に加えて撥水剤によるコーティングを施している。細管から出ている針金の長さは 12mm で、その先端 2mm がスパーサの下部（上流側）から挿入された位置関係となる。

ノズルはセンターサブチャンネル領域に 5 箇所、サイドサブチャンネル領域に 5 箇所装備されているが、本年度の試験では、各々における中心位置のノズルを代表して適用する。

2.1.5. 模擬スパーサ

本試験の評価対象としてテスト部に組込む模擬スパーサを図 2-6 に示す。原子力規制庁と協議のうえ、本年度は丸セル型を代表して本年度の評価対象とする。樹脂を用いて成型しており、丸セルの肉厚は 0.5mm、燃料棒との間隙（クリアランス）は 1.2mm、高さは 30mm である。

2.2. 計測系

本節では、本試験で着目する空気流、液膜及び液滴に対して各々実装された計測系について述べる。

2.2.1. 空気流計測

作動流体としてテスト部に供給する空気流の計測は、PIV（Particle Image Velocimetry）を用いる。ドイツ Lavision 社のパッケージシステム⁴⁾⁵⁾を導入した。表 2-2 に本計測システムの主要構成を示し、図 2-7 に計測時の各ハード機器の配置を示す。作動流体に照射するレーザーとそれを撮影するカメラは 90° の位置に配置し、横方向からレーザーに照射された流体内のトレーサー粒子をカメラが捉える形となる。レーザー及びカメラは共にトラバース装置に搭載され、テスト部の計測位置に基づいて鉛直方向移動・水平方向移動が可能となっている。

図 2-8 にソフトウェアのユーザーインターフェースを示す。ハード機器と常時連動しており、計測開始・終了の指示もこのインターフェースから行う。本図の左側はカメラにより撮影された原画像の表示ウインドウであり、右側がそれを画像相関法により解析した結果をコンター・ベクトルで描画した表示ウインドウである。上部には PIV に係る様々な設定を行うメニュー画面が用意されている。

2.2.2. 液膜計測

作動流体としてテスト部に射出された液滴がスパーサを通過した後にサブチャンネル流路内壁（模擬燃料棒）に衝突・付着する挙動は、多点電極フレキシブル基板で構成された液膜センサによって計測される。これは、液膜を生成する水のコンダクタンスがその厚さに伴って変化することを利用するもので、多点の電極を配置した基板を流路内壁表面に貼付することにより、液滴が付着して覆

われた電極における電位変化を計測し、液膜厚さに変換する。表 2-3 に液膜センサの基本仕様を示し、図 2-9 に主要構成と寸法を示す。多点電極を擁した基板は、流路内壁の模擬燃料棒の各々に貼付され、A1, A2, B1, B2, C1, C2 領域は半円周に 12 個、D1, D2 領域は 4/1 円周に 6 個の電極が水平方向に配列されており、鉛直方向には約 449mm の間に 128 個の電極が配列されている。全ての電極は端子からリード線を介して計測装置（ドイツ Teletronic 社製 WMS200 System⁷⁾）に連結される。WMS200 では、各電極における信号をサンプリングする速度（計測タイムステップに相当）、収録時間を指定してデータを取得・集約する。

図 2-10 に WMS200 のユーザーインターフェースを示す。ハード機器と常時連動しており、計測開始・終了の指示もこのインターフェースから行う。本図は計測したデータファイルをモニタリングする画面であり、左側に対象データファイルの指定と計測時の設定条件が表示され、右側に液膜センサ上に形成された液膜の可視化画面が表示される。液膜の可視化は、電極 1 つ 1 つを 1 画素として電位信号の最大電位に対する割合により青色の濃淡で示したものである。

2.2.3. 液滴計測

作動流体としてテスト部に射出する液滴の計測は、粒子追跡法（PTV: Particle Tracking Velocimetry）を用いる。空気流計測の PIV とハード機器（ドイツ Lavisision 社のパッケージシステム⁴⁶⁾）を共有でき、その配置及びソフトウェアが異なる。表 2-4 に本計測システムの主要構成を示し、図 2-11 に計測時の各ハード機器の配置を示す。作動流体に照射するレーザーとそれを撮影するカメラは、撮影対象の作動流体を挟んで反対側に配置し、液滴を後部からレーザーが照射した際の陰影（レーザーが遮られた領域）を液滴画像として捉える形となる。レーザー及びカメラは共にトラバース装置に搭載され、テスト部の計測位置に基づいて鉛直方向移動・水平方向移動が可能となっている。

図 2-12 にソフトウェアのユーザーインターフェースを示す。ハード機器と常時連動しており、計測開始・終了の指示もこのインターフェースから行う。本図の左側はカメラにより撮影された原画像の表示ウインドウであり、右側がそれを解析して液滴の存在確認及び寸法・速度の計算結果を示した表示ウインドウである。上部には液滴の解析に係る様々な設定を行うメニュー画面が用意されている。本試験では、次章にて後述するが、カメラの撮影画像を直接解析せず、画像中の液滴を認識し易くする画像処理を中間に介して再びソフトウェアに戻し、計算を行わせることとしている。これにより、大量の撮影画像を処理する際に大幅な時間効率化を図ることができる。

2.3. 作動流体

本試験は、テスト部を流れる気相流と、その中で射出され随伴して運搬される液滴流を作動流体とする。

- 気相流は空気を用いる。これに加えて空気流計測の際には、PIV による空気流計測のため、トレーサー粒子として水を成分とする液滴を混在させる。この場合の液滴は、空気流動への影響を無視し得る流量に留め、径は 10 μ m 程度の微小なものである。

- 液滴流は、水を成分とする。液滴計測の場合は水道水を用いるが、液膜計測の場合は計測感度を向上させるため水の励起電位を上げる目的で、イオン交換水に電解質として NaHCO_3 を 0.04wt%溶解させた溶液を用いる。 NaHCO_3 を選択した理由は、液膜センサ表面を腐食しないアルカリ性の電解質であることと、空気中の酸性物質である CO_2 との反応性が強くないことから、化学的及び電氣的に安定した状態の作動流体を維持できると判断されたことによる。

表 2-1 スペーサ影響評価試験の基本仕様

項目	内容
装置構成	燃料集合体内模擬流路, 模擬スペーサ, 液滴等発生器, 気相流量調節器, 計測系, 加湿器, 気液分離器など
計測機器	液膜センサ (模擬被覆管表面上に配置), 液滴径及び気相流速の測定装置 (画像解析による)
流動条件	<ul style="list-style-type: none"> • 圧力条件 : 大気圧 • 気相流速 : 0~10 m/s • 作動流体の温度 : 常温
作動流体	気相流 : 空気 液滴 : 水

表 2-2 空気流計測システムの主要構成

品目	主要仕様
高感度カメラ	型式：LaVision 社/Imager Pro X 2M 寸法：W84 mm×L175 mm×H66 mm センサ：プログレッシブスキャン CCD 有効画素数：1600×1200 pixel ダイナミックレンジ：14 bit ピクセルサイズ：7.4×7.4 μm 最小フレーム切替時間：110 ns フレームレート：14 フレーム/sec
レーザー光源	型式：ダブルパルス YAG レーザー EverGreen70 出力：70 mJ/Pulse 波長：532 nm パルス幅：≤10 nsec ビーム発散：<4 mrad ビーム径：<5 mm 寸法（ヘッド部）：151.1mm×102.7mm×399.7mm （電源部）：236.2mm×406.1mm×500.1mm
発光側トラバース装置	光学台寸法：W500×H500×L800 レール：（水平）750 mm（垂直）1300 mm レーザーマウント微調方向：±50mm 電動トラバース：1300 mm 稼動距離：1000 mm 最小分解能：±20 μm
受光側トラバース装置	光学台寸法：W500×H500×L500 レール：（水平）500 mm（垂直）1300 mm カメラマウント微調方向：±50mm 電動トラバース：1300 mm 稼動距離：1000 mm 最小分解能：±20 μm
解析ソフトウェア	基本ソフト：LaVison 社/DaVis8 ハードウェア制御 レーザー；パルス間隔（dt），出力，ON/OFF カメラ；撮影周期，撮影枚数 トラバース；移動量 解析ソフト：LaVison 社/2D-PIV 機能：自己相関，相互相関，PIV+PTV アルゴリズム

表 2-3 液膜計測センサの基本仕様

項目	内容
基板寸法	約 50×500 mm
外層銅箔厚	12 μm
表面処理	全面無電解金メッキ (Au0.03 μm 以上, Ni3-5 μm)
電極対数	12×128 対 正方配列
外部接続端子	60 ピン×3 箇所フレキシブルパッド FMG-6000.5-FX(1-60)60P
数量 (合計)	96 枚
励起電極配線	12 本
計測電極配線	128 本 (16×8)
解析ソフトウェア	型式: Telectronic 社 WMS200 System トランスミッタ (励起) 電極数: 128 レシーバ (計測) 電極数: 128 計測周波数: 10 kHz (トランスミッタ電極数: 16) 1.25 kHz (トランスミッタ電極数: 128) 最長測定時間: 30 分 トランスミッタアンプユニット: 8 個 プリアンプユニット: 8 個

表 2-4 液滴計測システムの主要構成

品目	主要仕様
高感度カメラ	型式：LaVision 社/Imager Pro X 2M 寸法：W84 mm×L175 mm×H66 mm センサ：プログレッシブスキャン CCD 有効画素数：1600×1200 pixel ダイナミックレンジ：14 bit ピクセルサイズ：7.4×7.4 μm 最小フレーム切替時間：110 ns フレームレート：14 フレーム/sec
レーザー光源	型式：ダブルパルス YAG レーザー EverGreen70 出力：70 mJ/Pulse 波長：532 nm パルス幅：≤10 nsec ビーム発散：<4 mrad ビーム径：<5 mm 寸法（ヘッド部）：151.1mm×102.7mm×399.7mm （電源部）：236.2mm×406.1mm×500.1mm
ディフューザユニット	入射波長：532±5 nm レーザー出力径：120 mm 程度 出力波長：550～600 nm 発光時間：5 nsec 入射時 20nsec 寸法：140mm×225mm×350mm
発光側トラバース装置	光学台寸法：W500×H500×L800 レール：（水平）750 mm（垂直）1300 mm レーザーマウント微調方向：±50mm 電動トラバース：1300 mm 稼動距離：1000 mm 最小分解能：±20 μm
受光側トラバース装置	光学台寸法：W500×H500×L500 レール：（水平）500 mm（垂直）1300 mm カメラマウント微調方向：±50mm 電動トラバース：1300 mm 稼動距離：1000 mm 最小分解能：±20 μm
解析ソフトウェア	基本ソフト：LaVison 社/DaVis8 ハードウェア制御 レーザー；パルス間隔 (dt)，出力，ON/OFF カメラ；撮影周期，撮影枚数 トラバース；移動量 解析ソフト：LaVison 社/Davis Particle Master 機能：粒子位置，粒子径，粒子速度、統計量

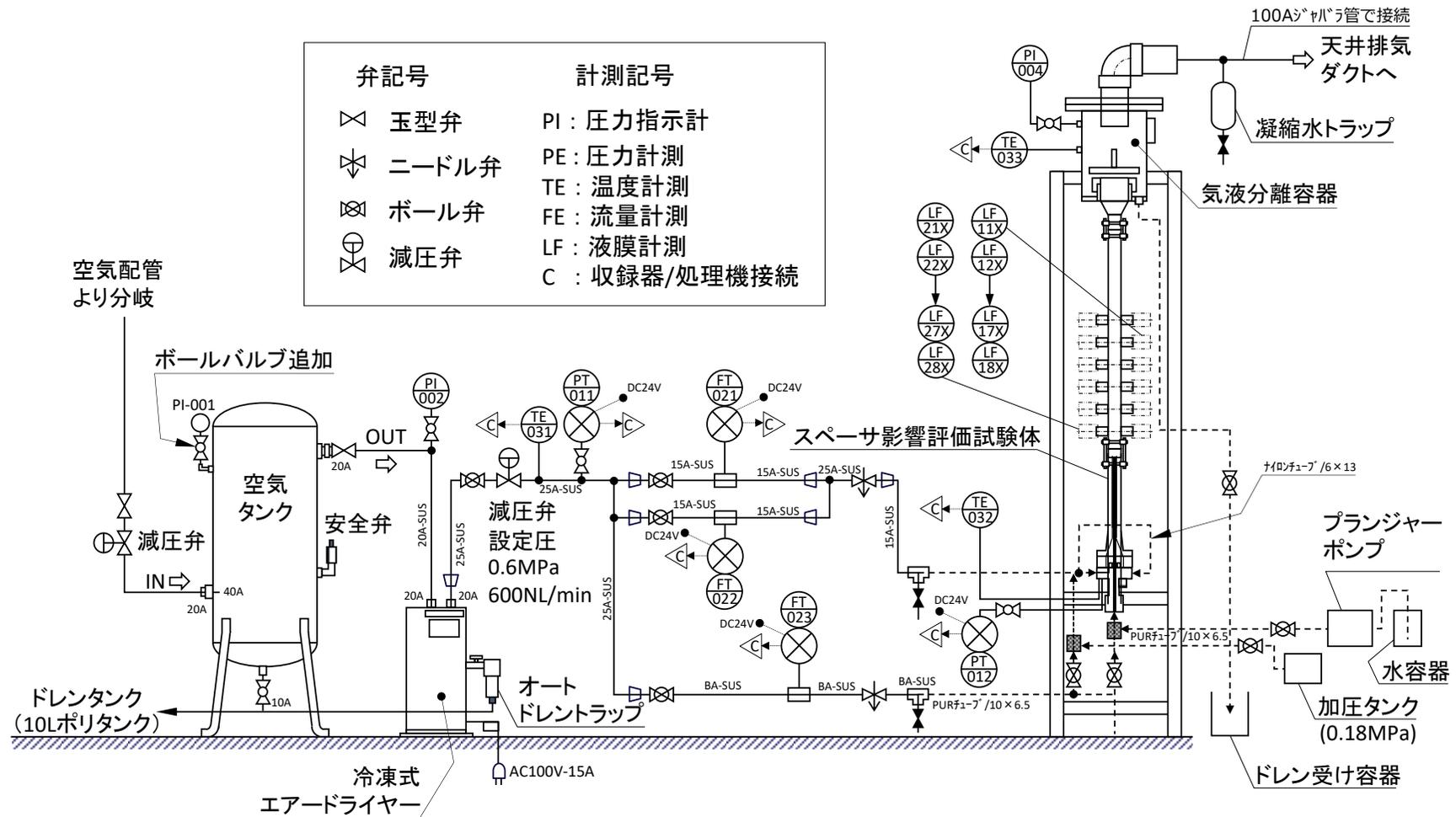


図 2-1 実験設備体系の全体概要

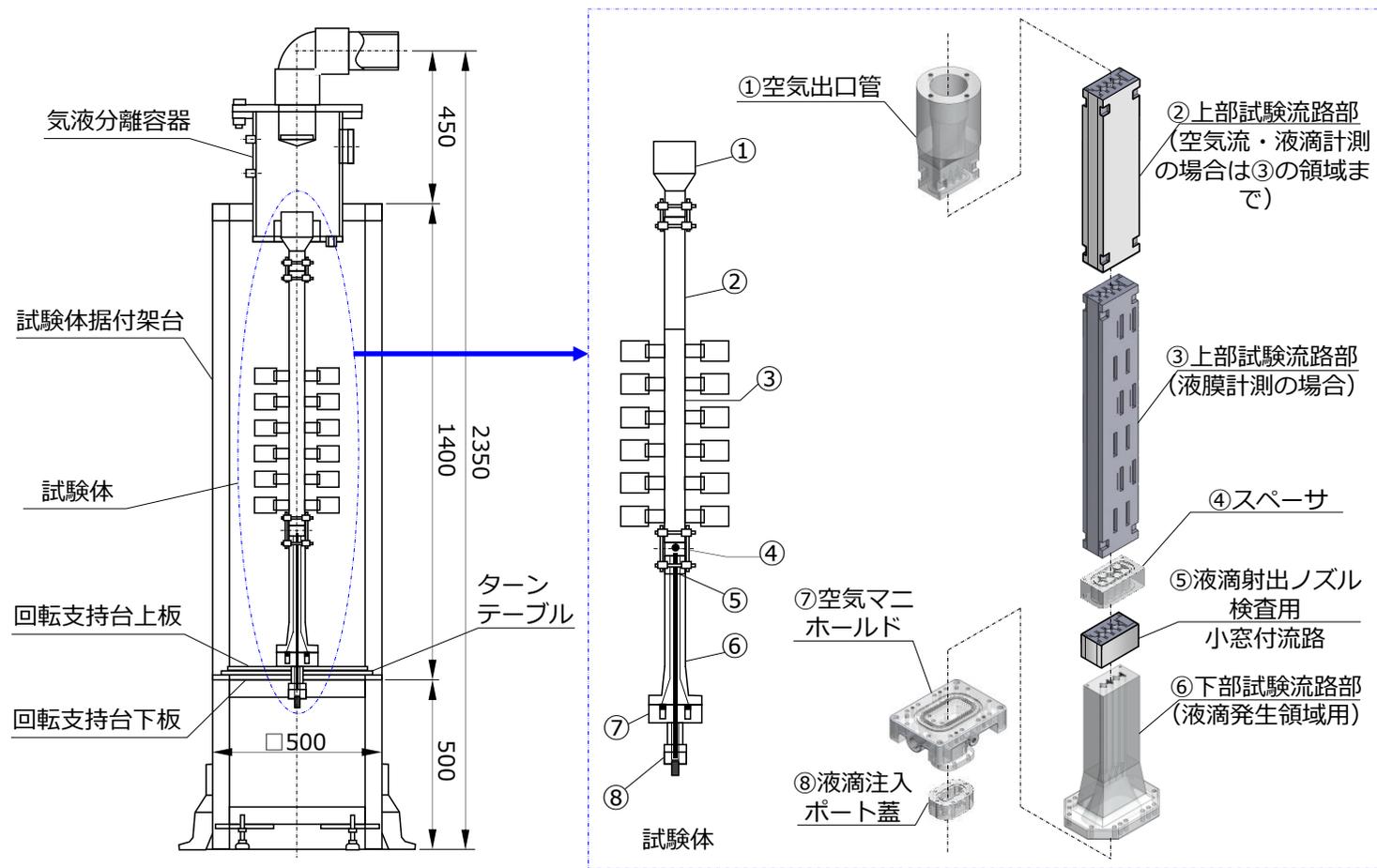


図 2-2 テスト部

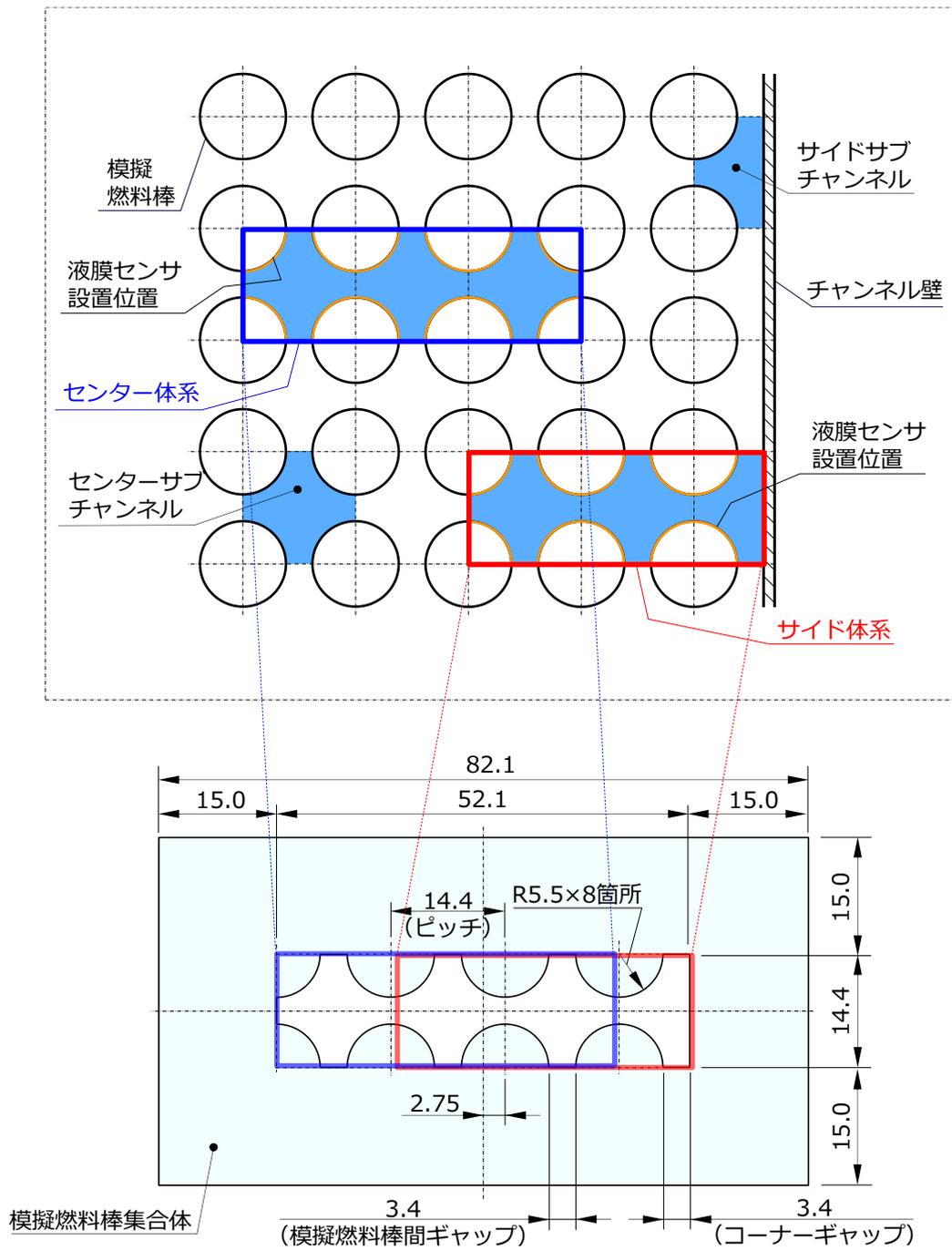


図 2-3 テスト部流路

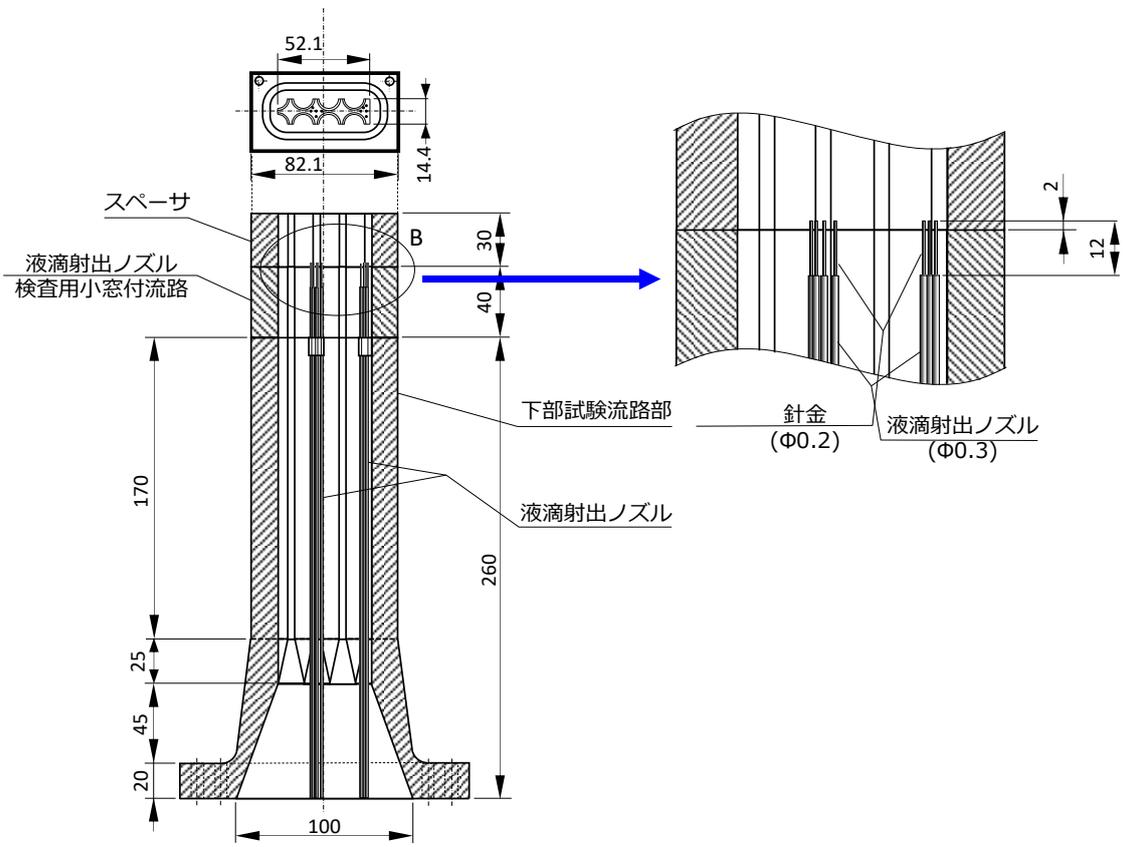


図 2-5 液滴射出部

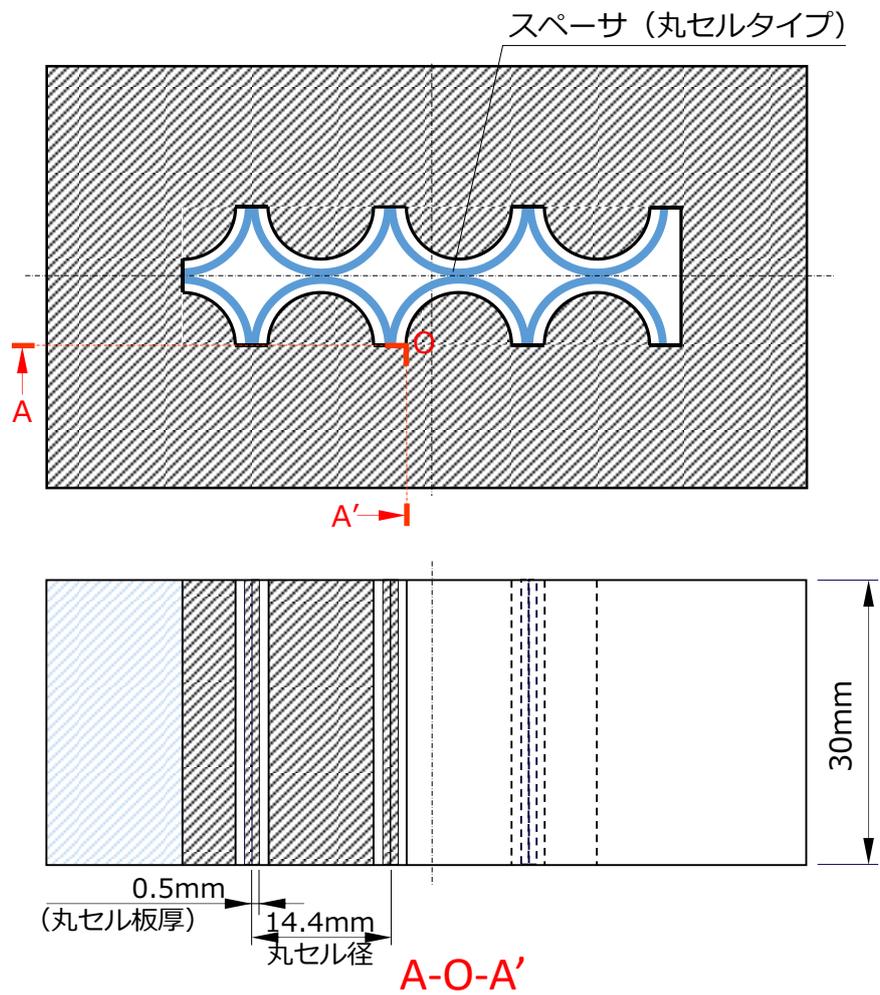


図 2-6 模擬スペーサ

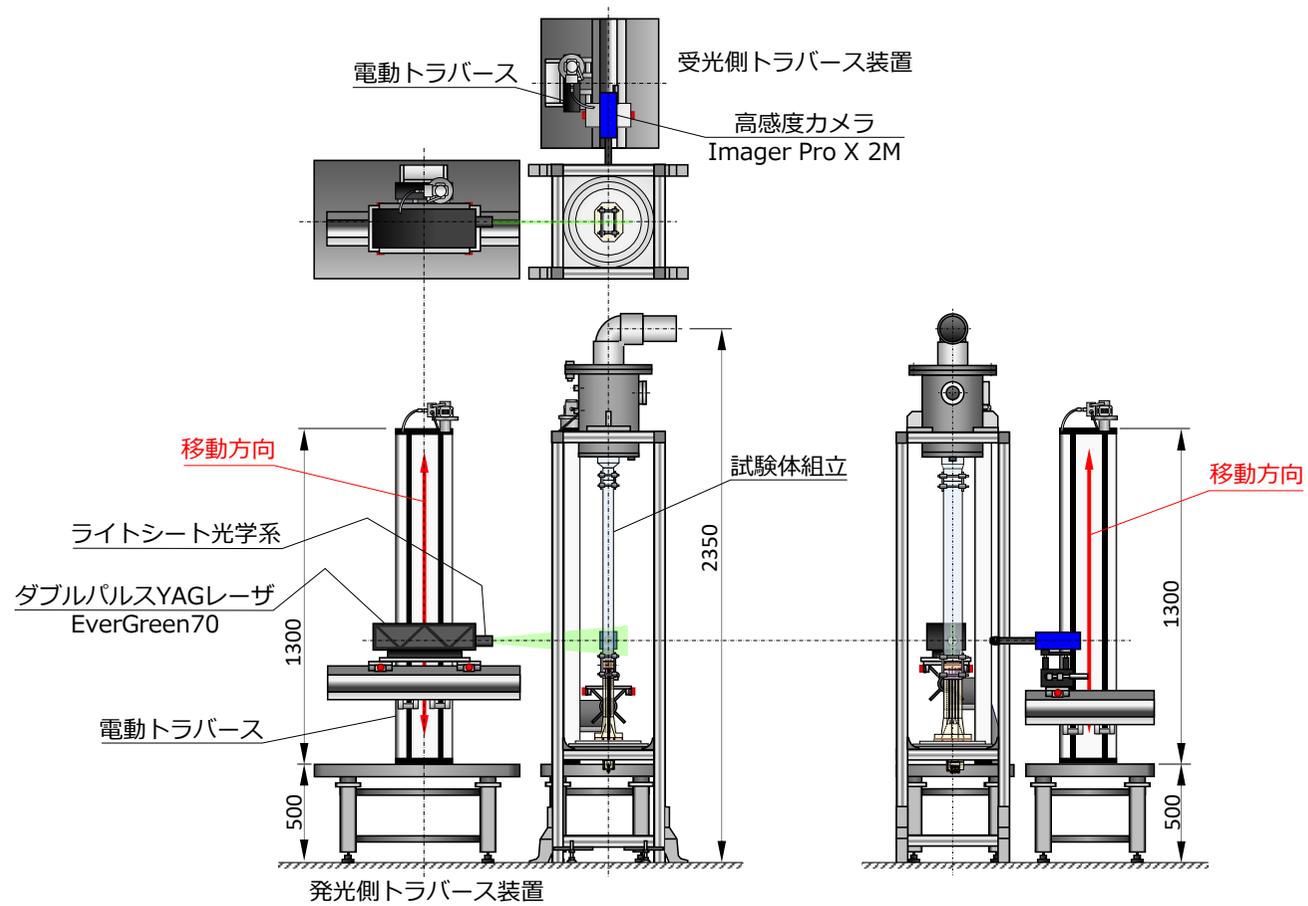


図 2-7 空気流計測：各ハード機器の配置

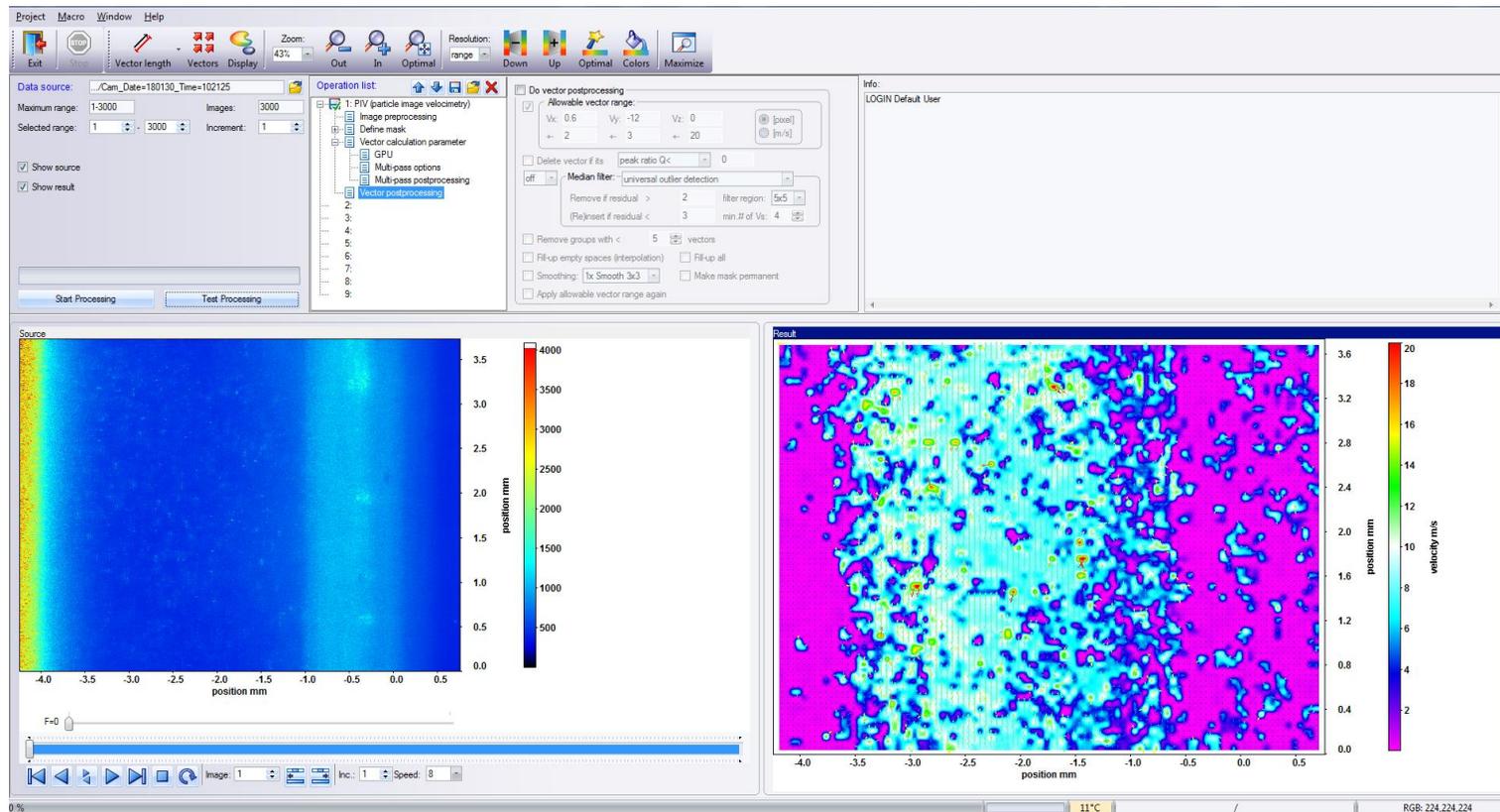


図 2-8 空気流計測：解析ソフトウェアのユーザーインターフェース

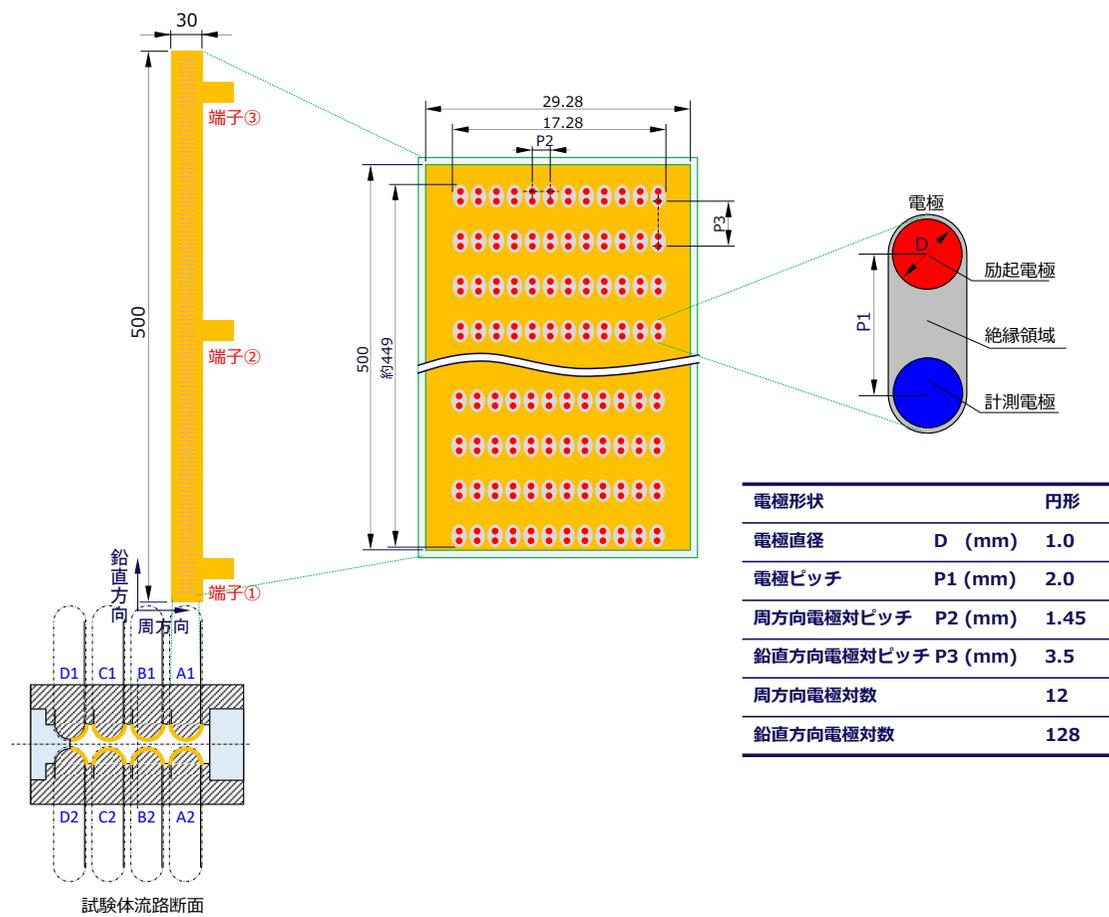


図 2-9 液膜センサの主要構成と寸法

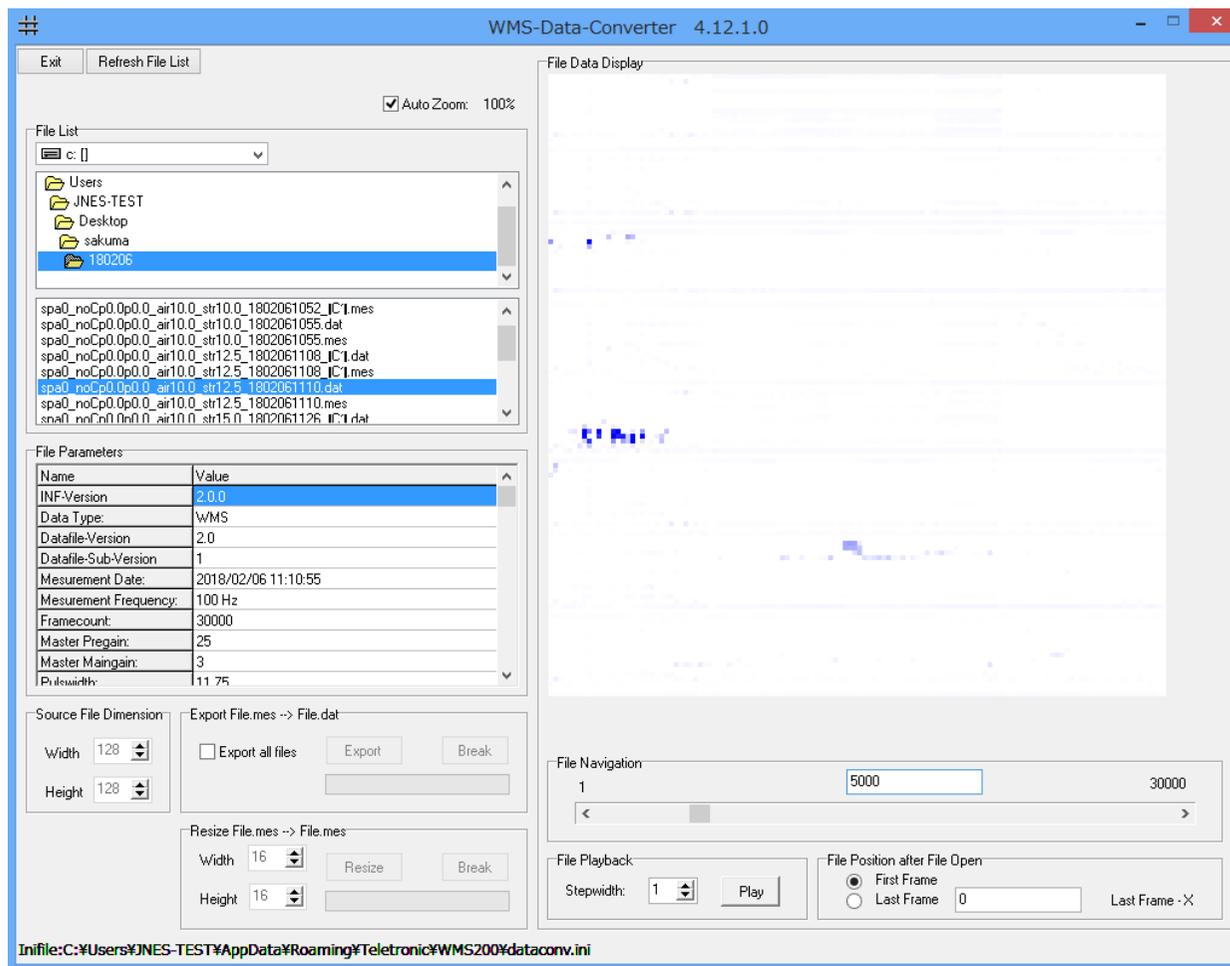


図 2-10 WMS200 のユーザーインターフェース

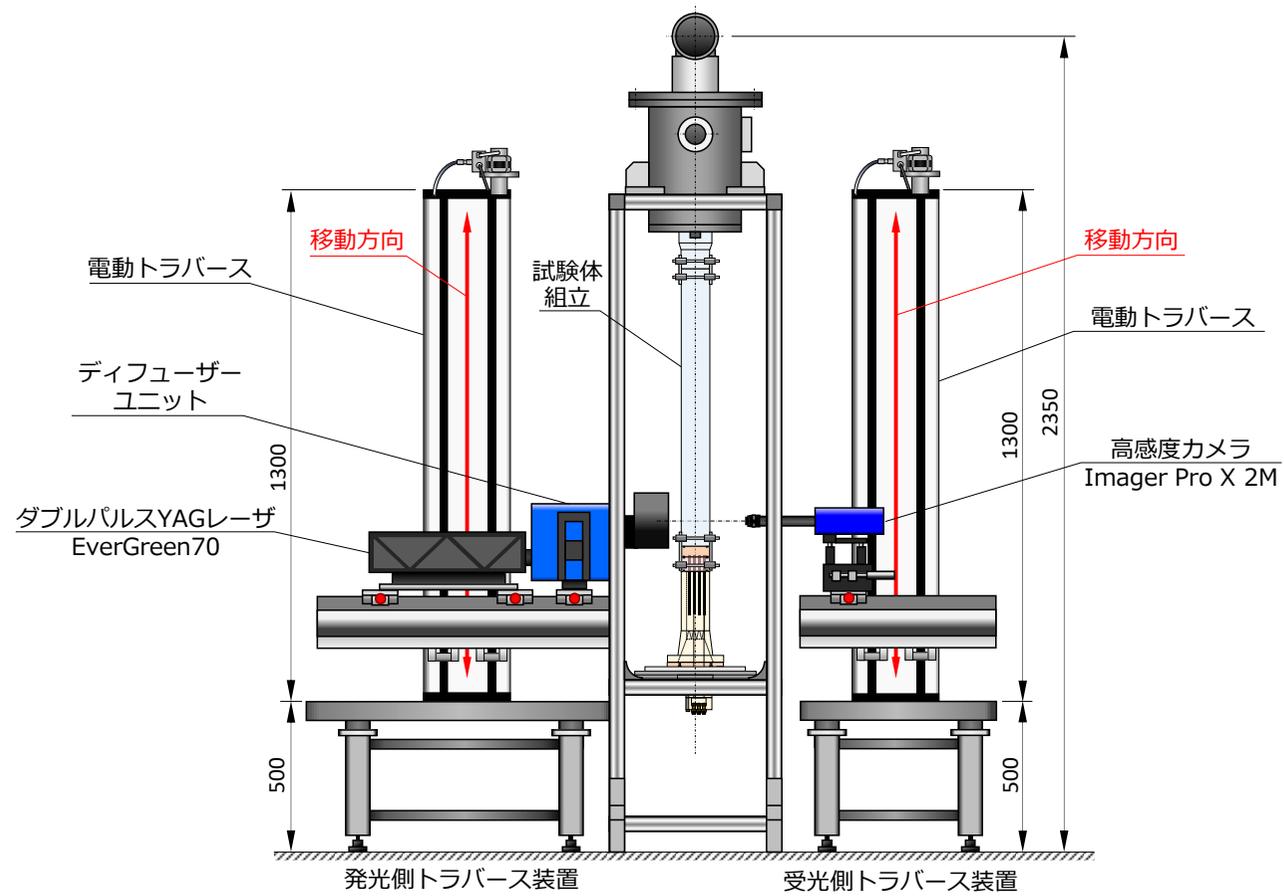


図 2-11 液滴計測：各ハード機器の配置

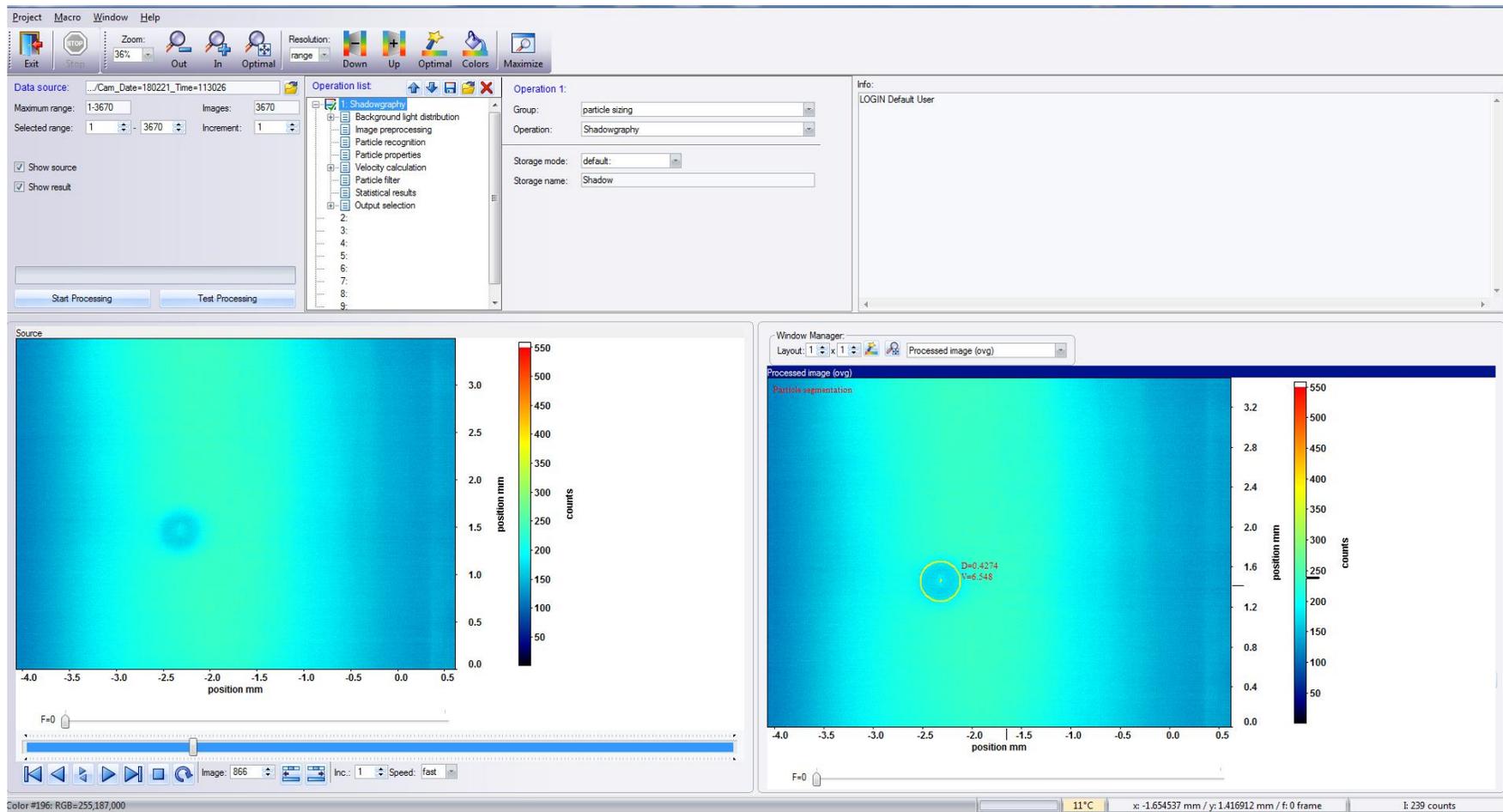


図 2-12 液滴計測：解析ソフトウェアのユーザーインターフェース

3. 実験の実施

本章では、前章で述べた実験装置を用いて行った実験について述べる。まず設定した実験条件及び適用した実験方法を記した後、実験結果及びその分析・考察を記す。

3.1. 実験条件

本試験において、系圧力及び温度はパラメータとせず、大気圧・常温状態（1気圧・20℃）を維持するものとする。

本節では、空気流・液膜・液滴の各計測項目について、着目するパラメータに応じて設定する実験条件を記す。

3.1.1. 空気流計測

テスト部流路を流れる空気流は、以下の項目に着目して計測を行うものとする。

- 水平方向の計測位置・・・流路断面内におけるどの領域を計測するか
- 鉛直方向の計測位置・・・流路鉛直方向におけるどの領域を計測するか
- 空気流の平均流速・・・空気平均流速の大小による局所流速への影響

上記をパラメータとして、表 3-1 に示す計測ケースを設定した。各ケースの計測方法を図 3-1 に示す。

3.1.2. 液膜計測

流路内壁の模擬燃料棒表面に付着する液膜は、以下の項目に着目して計測を行うものとする。

- サブチャンネル・・・センターサブチャンネルまたはサイドサブチャンネル（液滴射出ノズル位置）の違い
- 液滴放出量・・・射出される液滴の頻度・量の違いによる液膜形成への影響
- 空気流の平均流速・・・液滴を随伴する空気流の大小による液膜形成への影響

上記をパラメータとして、表 3-2 に示す計測ケースを設定した。

3.1.3. 液滴計測

ノズルから射出されて空気流に随伴して流れる液滴は、以下の項目に着目して計測を行うものとする。

- サブチャンネル・・・サブチャンネル模擬流路におけるセンター体系あるいはサイド体系（液滴射出ノズルの位置）の違い
- 水平方向の計測位置・・・流路断面内におけるどの領域を計測するか
- 鉛直方向の計測位置・・・流路鉛直方向におけるどの領域を計測するか
- 空気流の平均流速・・・液滴を随伴する空気流の大小による液滴挙動への影響

上記をパラメータとして、表 3-3 に示す計測ケースを設定した。各ケースの計測方法を図 3-2 に示す。なお、液滴放出量については、本計測では全ケースにお

いて一定 (101mg/min) とした。

3.2. 実験方法

本節では、空気流・液膜・液滴の各計測項目について、計測を行ってデータを取得する際の方法やプロセスについて記す。

3.2.1. 空気流計測

図 3-3 に空気流計測の作業フローを、表 3-4 に空気流計測に必要な設定項目をそれぞれ示す。

空気流計測は、既述の通り PIV により計測を行うが、画像解析には画像相関法を用いる。この手法は、トレーサー粒子を含んだ空気流を小さな時間幅で撮影した 2 枚の画像データの相互相関をとり、変位ならびに速度ベクトルを算出するものである。

3.2.2. 液膜計測

図 3-4 に液膜計測の作業フローを、表 3-5 に液膜計測に必要な設定項目をそれぞれ示す。

液膜計測は、既述の通り WMS により計測を行うが、液膜センサの電極が検知する電位変化と液膜厚さとの関係を求めるキャリブレーションが必要となる。

これは、図 3-6 に示すような治具を用意して液膜センサを固定し、表面を既知の厚さの液膜で浸された状態で電位を計測する。これを複数の異なる厚さを形成できる治具で行い、結果をプロットすることにより、液膜厚さ—電位の関数を取得する。こうして得られたキャリブレーション曲線を図 3-7 に示す。この図から、計測可能な液膜の最大厚さは、概ね 1mm 程度と判断される。また、このキャリブレーション曲線の形状から、以下に示すような指数関数によるフィッティング式を導出した。

$$y = 1.198[1 - \exp(-1.671 \times 10^{-3}x)] \dots \dots \dots (1)$$

y : 規格化電位[-], x : 液膜厚さ[μ m]

この式の逆関数を求め、液膜センサから得られる電位信号を入力値として液膜厚さに換算する。

なお、このキャリブレーション曲線は電位を規格化して整備しており、液膜センサにおける全ての電極に適用するために、各電極が最大厚さの液膜で浸された時の電位 (最大電位) を求め、その値とキャリブレーション曲線で電極ごとに電位計測値から液膜厚さへの変換を行う。これは、液膜センサが装着されたテスト部流路を満水にして全域が最大液膜厚さに達している状態を作り出すことにより計測を行う。

さらに、電極が液膜に浸されていない (液膜厚さ=0) 場合、電位値は理想的に 0 であるが、液膜センサ製作時に生じる微小な隙間に液体が入り込む等の不可避な誤差が考えられ、実際には 0 にならない。そこで、各計測にあたって、液膜センサ表面が乾いた状態である初期段階に、1 分間ほど電位計測を行い、その値を

実験開始後の計測値からオフセットすることにより調整を施す。

こうして取得される液膜センサからのデータは、1分間の計測あたり約200MBの大容量となるため、汎用技術計算ソフトウェア MATLAB[®]を利用して電位から液膜厚さへの変換とその結果の可視化に至る一連のデータ処理を半自動的に行えるよう整備した。

3.2.3. 液滴計測

図 3-5 に液滴計測の作業フローを、表 3-6 に液滴計測に必要な設定項目をそれぞれ示す。

液滴計測は、既述の通り PTV (粒子追跡法) により計測を行うが、カメラの撮影周期の設定に関する制限から、液滴の射出周期と同期をとることが極めて困難であり、大量のカメラ撮影を行いその中から液滴を捉えられているものを選別する方式を採る。このため、画像解析の時間的負荷が大きくなる。そこで、液滴選定の段階では、汎用技術計算ソフトウェア MATLAB[®]の画像処理機能を利用し、撮影原画像からノイズや干渉等による汚れを取り除いて液滴画像のみのバイナリイメージに変換した上で、再び PTV の解析ソフトウェアに戻して画像解析を行うようにすることで、大幅な時間効率化を実現した。

液滴放出量は、テスト部に液滴を供給するプランジャーポンプの特性に依存し、特にストロークが重要な因子となる。本試験で用いたプランジャーポンプに対して、ストロークと吐出速度の関係を図 3-8 に示す。ストロークに対して吐出速度が比例関係にあるが、近似直線が原点を通らないのは、見た目のストローク長さに対してある程度の“遊び”区間が設けられているものと思われる。

さらに、本試験でパラメータとする吐出速度に対して、射出される液滴のサイズと数量の関係を見積もってみる。液滴を一定の直径の球形と仮定すると、ある時間内で射出される液滴数は、以下に示す式で計算される。

$$n = \frac{w_d t}{\pi \rho d^3 / 6} \times 10^3 \dots\dots\dots (2)$$

n : 液滴数[個], w_d : 液滴射出速度[mg/min], t : 時間[min],

ρ : 液滴密度[mg/min], d : 液滴径[mm]

この式から、液滴径と液滴数の関係を表したものを図 3-9 に示す。

3.3. 実験結果

本節では、前々節・前節に述べた実験条件・実験方法に基づき、空気流・液膜・液滴について計測を実施した結果とその分析について記す。

3.3.1. 空気流計測

各ケースの空気流計測結果を図 3-10 に示す。本計測では、サブチャンネルを模擬した複雑形状の流路の平坦領域にカメラを設置し、中心部分にレーザーシートを当てて撮影を行っており、流路の円周部分における光の屈折・干渉等で特に左右端においてトレーサー粒子の捕捉が芳しくない状況があり、PIV の解析は

瞬時値でなく一定時間の平均値を表している。

鉛直方向の流速について、実験における設定パラメータとしての空気平均流速は、テスト部に供給する空气体積流量をテスト部流路面積で除した値を代表させており、流路断面内では一定流速でなく分布を形成しているものと考えられる。センターサブチャンネルではその中心が最も壁面から遠く、結果として設定した空気平均流速より高い流速が計測されている。サイドサブチャンネルも同じ中心位置を計測しているが、近傍に側壁があり流速計測値は空気平均流速よりも低くなっている。

水平方向の流速については、時間平均で見た場合、サブチャンネルの位置及び高さ、空気平均流速に基づく有意な違いや傾向は見られず、 $\pm 0.1\text{m/s}$ 未満の小さい速度成分で推移している。

各速度成分の標準偏差にも計測条件に基づいた有意な違いや傾向は見られないが、水平方向・鉛直方向とも概ね同じオーダの値を示しており、速度絶対値の小さい水平方向に対する速度の分散傾向がやや強いものと見られる。

3.3.2. 液膜計測

各ケースの液膜計測結果を図 3-11 に示す。全般的な傾向として、本計測においては、液膜が形成（＝液滴が衝突・付着）されるのはスぺーサ直上から 140mm 程度の高さまでであり、それより下流側（流路上方側）にはほとんど液膜の形成は見られなかった。これが、計測時間によらず飽和する特性を持つことによるものか、あるいは計測時間に依存して長期間行えば下流側にも液膜が形成されるようになるのか、今後の課題として認識しておく必要がある。

さらに、本計測ではいずれのケースにおいてもサブチャンネル流路の片側（センターの場合は B1 及び C1、サイドの場合は A1）にほとんどの液滴が付着する傾向を示した。サブチャンネル流路はノズル位置を通る軸線（センターの場合は縦横共に、サイドの場合は横のみ）に対して対称形状であり、理想的な構造と環境下であればこうした液膜形成の指向性は現れないと考えられ、原因の明確化を今後の課題として認識しておく必要がある。液滴射出ノズルの鉛直方向からのずれ、ノズル先端の性状、ノズルへの液滴の供給源であるプランジャーポンプの駆動特性、液膜センサ表面の濡れ性、等々の計測の不確かさを洗い出し、その定量的評価を進めていくことが今後必要である。

図 3-12 には、液膜計測データを整理し、本計測時間において液膜の計測された（＝液滴が付着した）面積と、その付着（衝突）回数分布を示した。液滴付着面積割合は、スぺーサ直上 140mm までの領域の各センサにおいて液膜が形成されたかどうかを確認し、その範囲を面積で表したものであり、形成された液膜の厚さの条件を高くするほどその面積は小さく評価される。

液滴付着回数分布は、サブチャンネルの中心に位置するノズルを通る縦線に対する角度で各センサに形成された液膜の位置を座標化し、スぺーサ直上からの高さと合わせて液滴運動の指向性を明示している。ここで液滴付着回数とは、各液膜センサにおける液膜の累積厚さ（液膜の瞬時値や最大値でなく増加分のみを累積した計測時間内の最終値）にセンサ 1 個の占有面積を乗じ、それを液滴 1 個の体積（後述の液滴計測において評価された液滴径の代表値を用い、球

形として体積を算出) で除した値として定義している。上述の通り、液膜の形成が見られているのは、サブチャンネル流路の片側を示す $\pm 45^\circ$ 周辺の領域 (A1,B1,C1 に相当) がほとんどである。ただし、液滴放出量が大きくなると、 $\pm 45^\circ$ 周辺のみならず $\pm 135^\circ$ 周辺にも液膜が生じるようになっているため、この指向性は液滴射出回数の問題とも考えられ、今後一層のデータの統計的分析のために十分なデータの蓄積を進めていく必要がある。

3.3.3. 液滴計測

各ケースの液滴計測結果から、まず液滴径の計測値をヒストグラムとして図 3-13 に示す。得られた液滴径の最頻値は 0.36mm であり、液滴放出頻度や周囲空気流速などに影響されず概ね一定値であることが確認された。BWR における液滴径は 0.05~0.5mm の範囲であると考えられることから、計測値は BWR で発生すると考えられる液滴径範囲内であり、本試験が良好な模擬性を有していることが確認された。

次に、計測された液滴の速度ベクトルを図 3-14 に示し、各速度成分をヒストグラムとして示した分布を図 3-15 に示す。鉛直方向高さ 0mm の計測においては、水平方向について流路の短辺側にカメラを設置した方向 (流路短辺方向) と流路の長辺側にカメラを設置した方向 (流路長辺方向) の二方向から計測を行い、三次元方向の速度挙動を観察した。

流路短辺方向の速度ベクトルは全般的傾向として、鉛直方向に概ね整然としており、また原点 (液滴射出ノズル位置) よりも正座標側に偏在しており、既述の液膜計測において液膜形成が偏在していた位置と一致する。

一方、流路長辺方向の速度ベクトルは、水平方向成分が大きく分散しており、流路短辺方向よりも乱れが激しい状況にあることが示唆される。しかし、本計測において得られた液滴数では統計的な観点からの考察が難しく、計測技術を向上させ、より多数の液滴数の捕捉を可能とする必要がある。ただし定性的にセンターサブチャンネルとサイドサブチャンネルを比較すると、センターサブチャンネルのほうがより水平方向の速度ベクトルの分散が大きいと同時に、捕捉された液滴の位置も広がりが大きく、逆にサイドサブチャンネルでは速度成分のヒストグラムも比較的整った形状で捕捉位置も狭い領域に集約されている。

鉛直方向の計測については、既述の液膜計測においてスペーサ直上 140mm 程度までの高さに液膜が形成されていたことを踏まえ、液滴計測ではその半分強の 80mm での計測を行ったが、高い位置ほど計測で捕捉できる液滴数は少なくなり、データ取得が困難になった。ただし、定性的な傾向としては上述の通り、センターサブチャンネルのほうがより水平方向の速度ベクトルの分散が大きく、サイドサブチャンネルでは速度成分のヒストグラムは比較的整っている。

3.4. 分析・考察

液滴放出量の影響を比較するため、液膜計測において 3 パターンの液滴放出量で計測を行い、各々を重ねて示した結果を図 3-16 に示す。液滴射出の頻度を高めるに従い、燃料棒表面への衝突頻度は高くなり、同時に燃料棒濡れ面積も拡大していることが分かる。

また、サブチャンネルの違い（センターとサイド）を比較するため、各々に対して異なる3パターンの空気平均流速で実施した結果を図3-17に示す。センターサブチャンネルでは空気流速が遅いほど燃料棒濡れ面積が大きくなる一方、サイドサブチャンネルでは空気平均流速が速いほど燃料棒濡れ面積が大きくなっている。また、センターサブチャンネルでは若干下流側（上方側）に液膜分布の中心が移行している一方、サイドサブチャンネルではスペーサに近い領域により多くの液膜が生成されている。本計測においてはサブチャンネルによる違いがこうして見られているが、前節に記したように液膜生成位置や液滴挙動の計測において指向性が現れており、その原因の解明にはさらなるデータの蓄積と不確かさの評価を要することから、ここで見られた傾向に対する分析も今後の課題として留意する必要がある。

表 3-1 空気流計測ケース

ケース番号	水平方向の計測位置※ ¹	鉛直方向の計測位置※ ²	空気流の平均流速
PIV-01	センター	0mm	4m/s
PIV-02	センター	0mm	7m/s
PIV-03	センター	0mm	10m/s
PIV-04	センター	40mm	4m/s
PIV-05	センター	40mm	7m/s
PIV-06	センター	40mm	10m/s
PIV-07	センター	80mm	4m/s
PIV-08	センター	80mm	7m/s
PIV-09	センター	80mm	10m/s
PIV-10	サイド	0mm	4m/s
PIV-11	サイド	0mm	7m/s
PIV-12	サイド	0mm	10m/s
PIV-13	サイド	40mm	4m/s
PIV-14	サイド	40mm	7m/s
PIV-15	サイド	40mm	10m/s
PIV-16	サイド	80mm	4m/s
PIV-17	サイド	80mm	7m/s
PIV-18	サイド	80mm	10m/s

※₁ センター:センターサブチャンネル、サイド:サイドサブチャンネル

※₂ スペーサ直上からの距離

表 3-2 液膜計測ケース

ケース 番号	サブチャンネル (液滴射出ノズル位置)	液滴放出量	空気流 の平均流速
LF-01	センター	101mg/min	4m/s
LF-02	センター	101mg/min	7m/s
LF-03	センター	101mg/min	10m/s
LF-04	センター	137mg/min	10m/s
LF-05	センター	175mg/min	10m/s
LF-06	サイド	101mg/min	4m/s
LF-07	サイド	101mg/min	7m/s
LF-08	サイド	101mg/min	10m/s

表 3-3 液滴計測ケース

ケース 番号	サブチャンネル (液滴射出ノズル位置)	鉛直方向 の計測位置※ ¹	空気流 の平均流速
PM-01	センター	0mm	4m/s
PM-02	センター	0mm	7m/s
PM-03	センター	0mm	10m/s
PM-04	センター	40mm	4m/s
PM-05	センター	40mm	7m/s
PM-06	センター	40mm	10m/s
PM-07	センター	80mm	4m/s
PM-08	センター	80mm	7m/s
PM-09	センター	80mm	10m/s
PM-10	サイド	0mm	4m/s
PM-11	サイド	0mm	7m/s
PM-12	サイド	0mm	10m/s
PM-13	サイド	40mm	4m/s
PM-14	サイド	40mm	7m/s
PM-15	サイド	40mm	10m/s
PM-16	サイド	80mm	4m/s
PM-17	サイド	80mm	7m/s
PM-18	サイド	80mm	10m/s

※¹ スペーサ直上からの距離

※² 液滴放出量は全ケースで一定 (101mg/min) とした

表 3-4 空気流計測に必要な設定項目

項目	設定値	備考
変位計測時間間隔	2.5 μ s	
時系列撮影時間間隔	7.5Hz	
PIV 探査窓	32×32pixel	
PIV オーバーラップ	50%	
PIV 平均化処理	各探査窓で時間平均	流速計算値が欠損 (0m/s)した領域・時刻 は除いて平均化

表 3-5 液膜計測に必要な設定項目

項目	設定値	備考
計測時間間隔	10ms	
計測時間 (初期乾燥時)	1分	
計測時間 (液滴射出時)	10分	
ゲイン	プリ:25 メイン:3	
電解質溶液濃度	0.04wt%	溶質: NaHCO ₃ 導電率約 500 μS/cm に相当 (20°C)

表 3-6 液滴計測に必要な設定項目

項目	設定値	備考
変位計測時間間隔	2.5 μ s	
時系列撮影時間間隔	12Hz	
液滴として識別する画像の最小面積	5000pixel	画像中に写る液滴の識別のため
液滴として識別する画像の最大面積	20000pixel	画像中に写る液滴の識別のため
液滴として識別する画像の最大離心率	0.6	画像中に写る液滴の識別のため

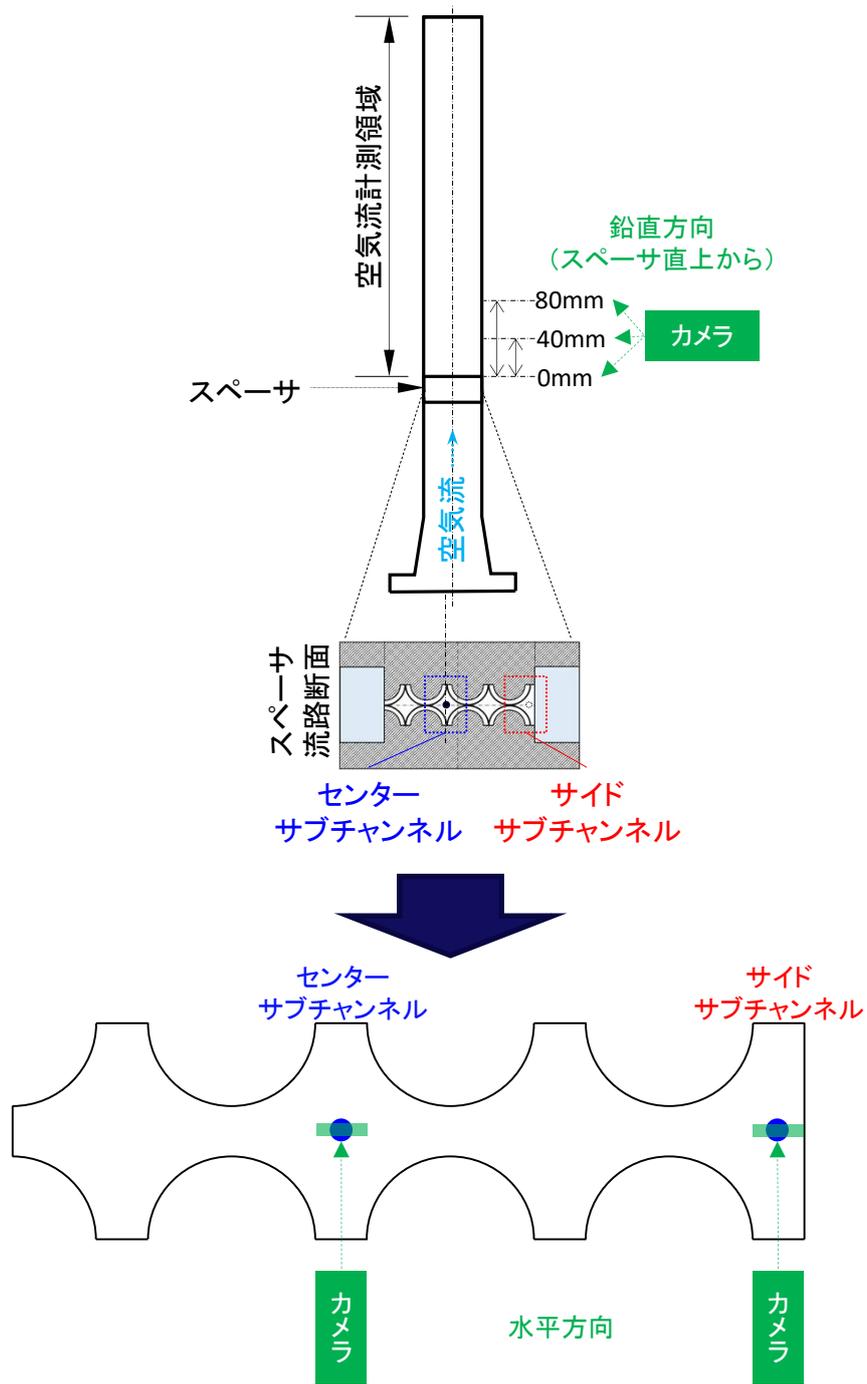


図 3-1 空気流計測方法

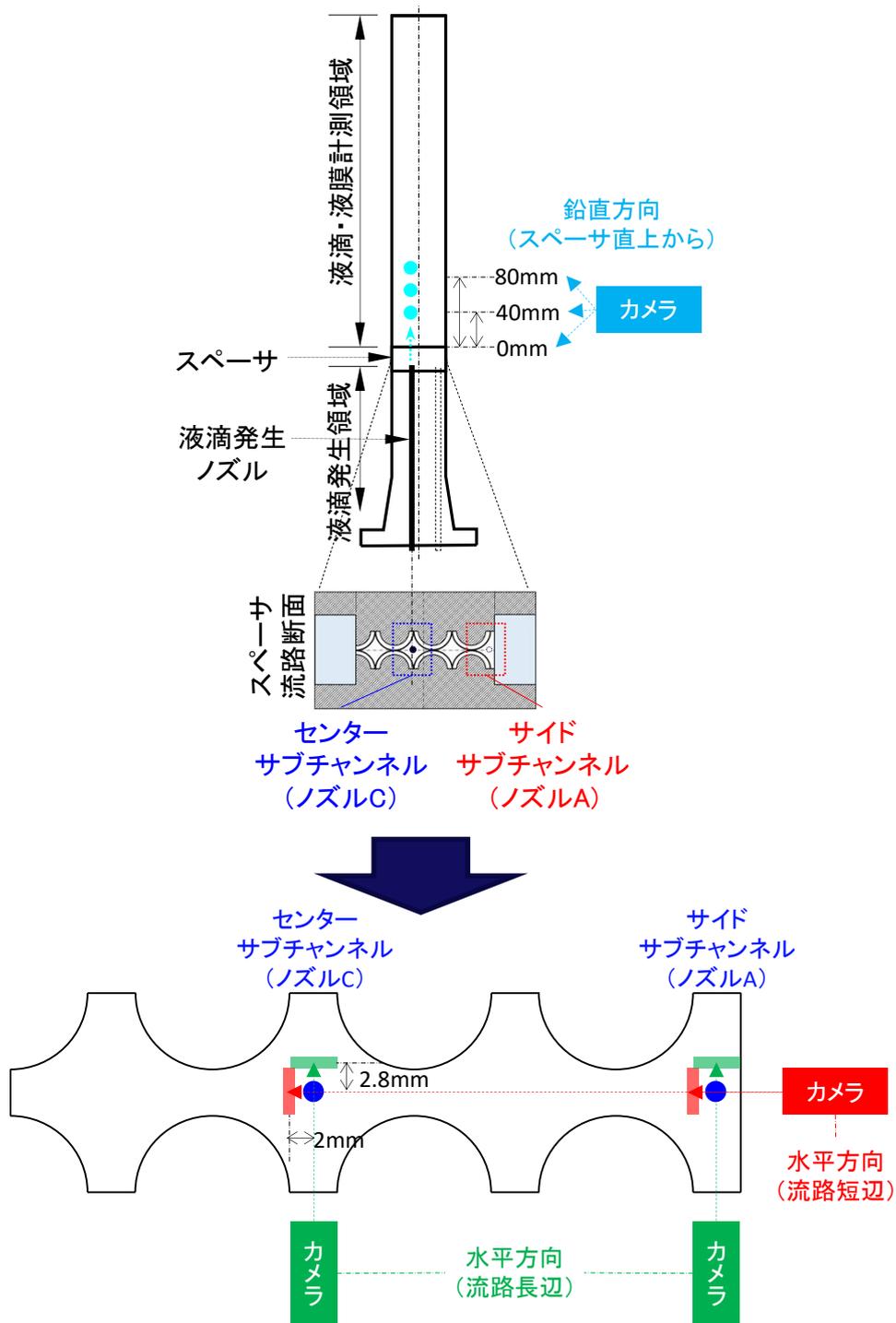


図 3-2 液滴計測方法

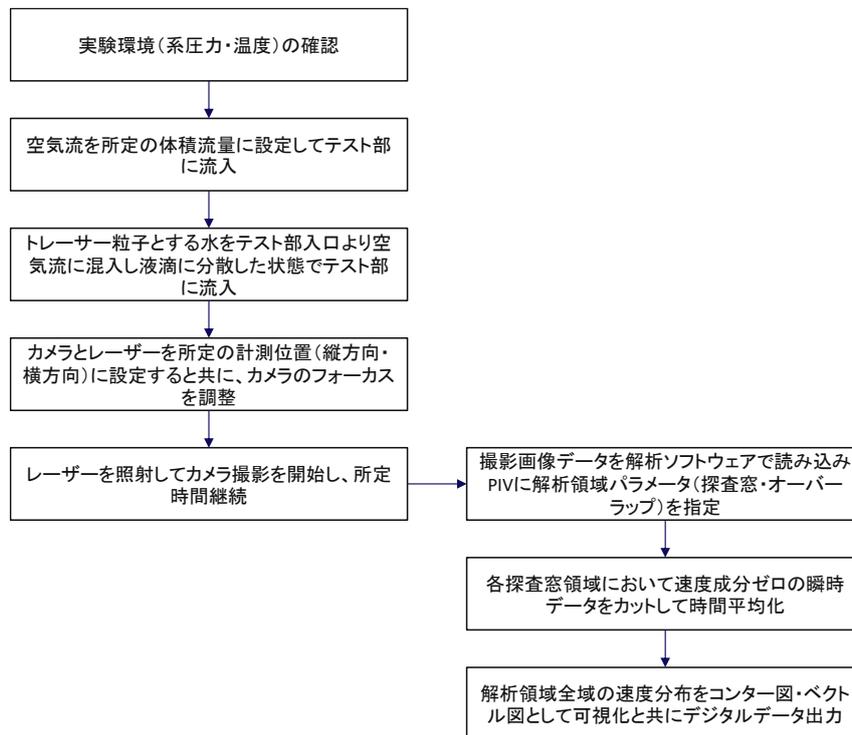


図 3-3 空気流計測の作業フロー

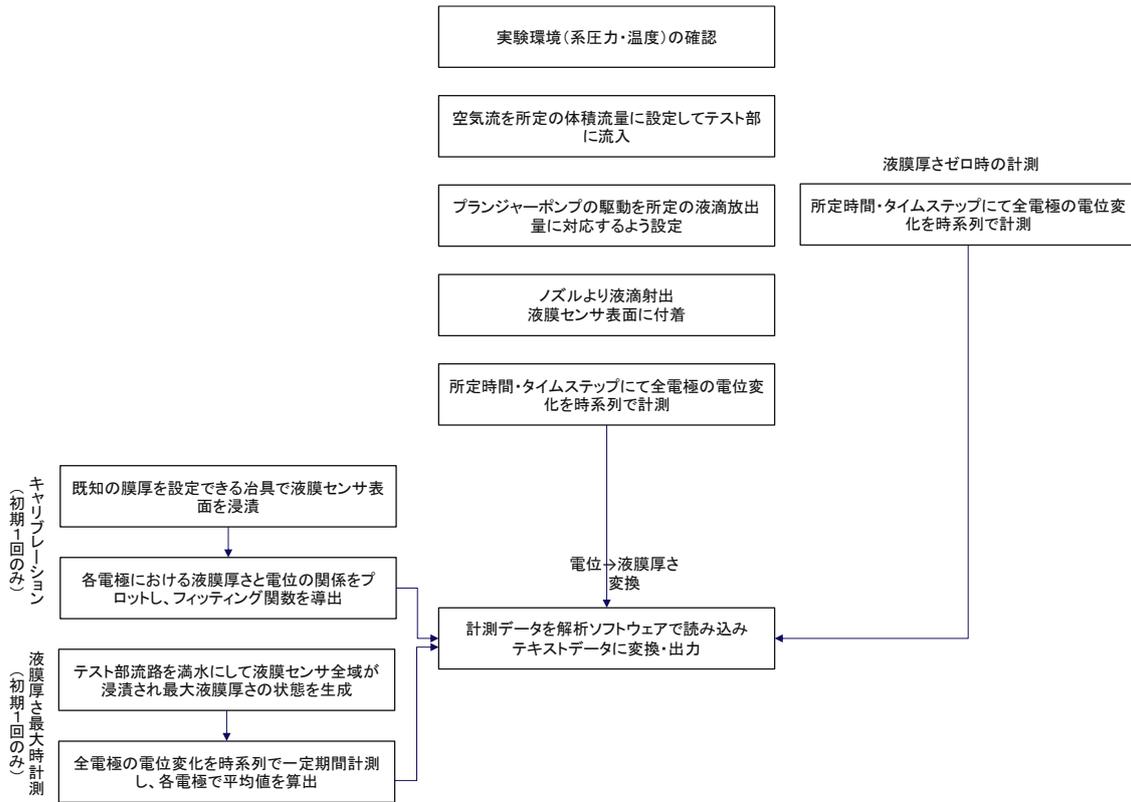


図 3-4 液膜計測の作業フロー

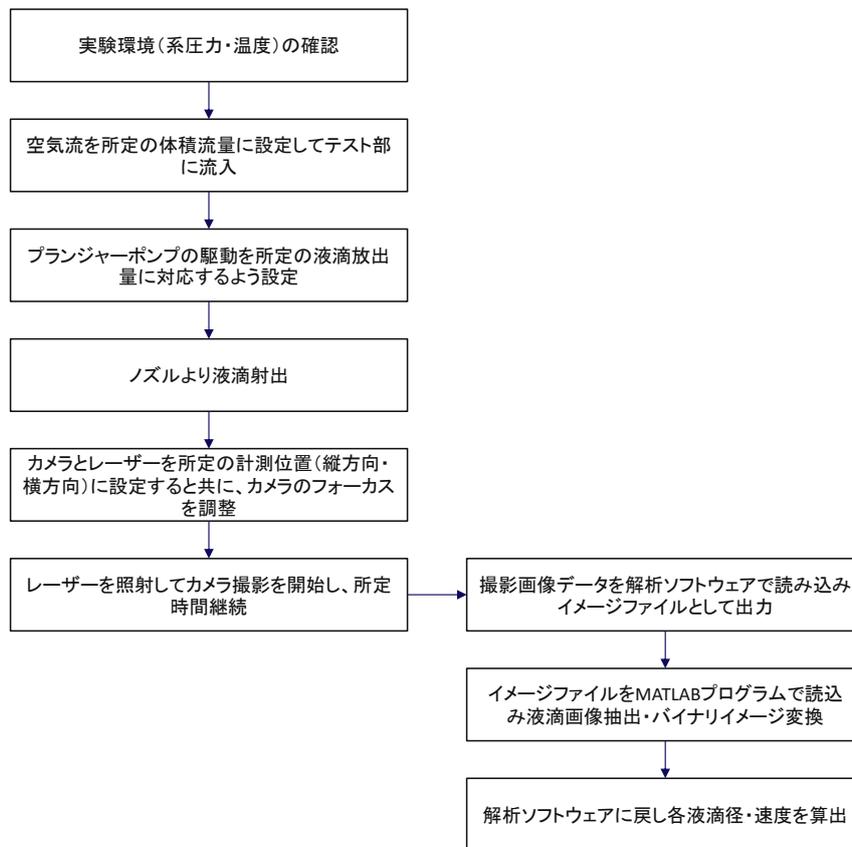


図 3-5 液滴計測の作業フロー

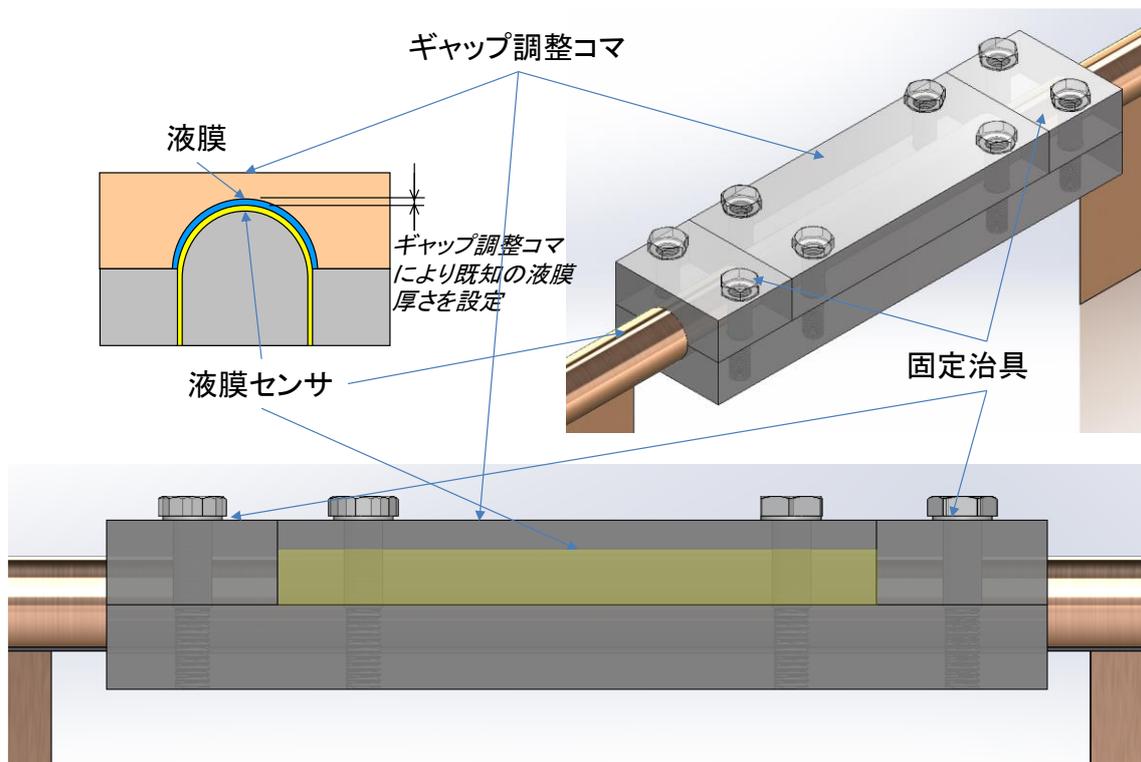


図 3-6 液膜センサのキャリブレーション方法

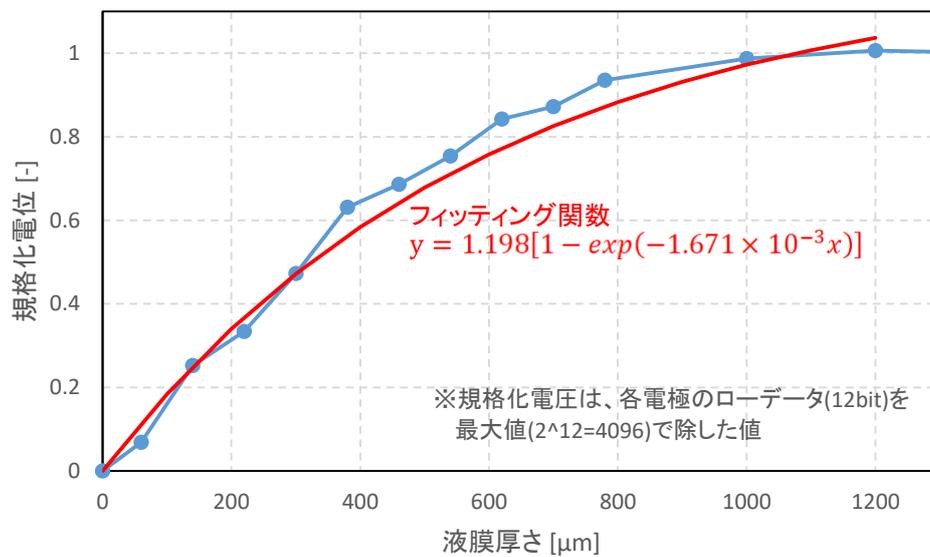


図 3-7 液膜センサのキャリブレーション曲線

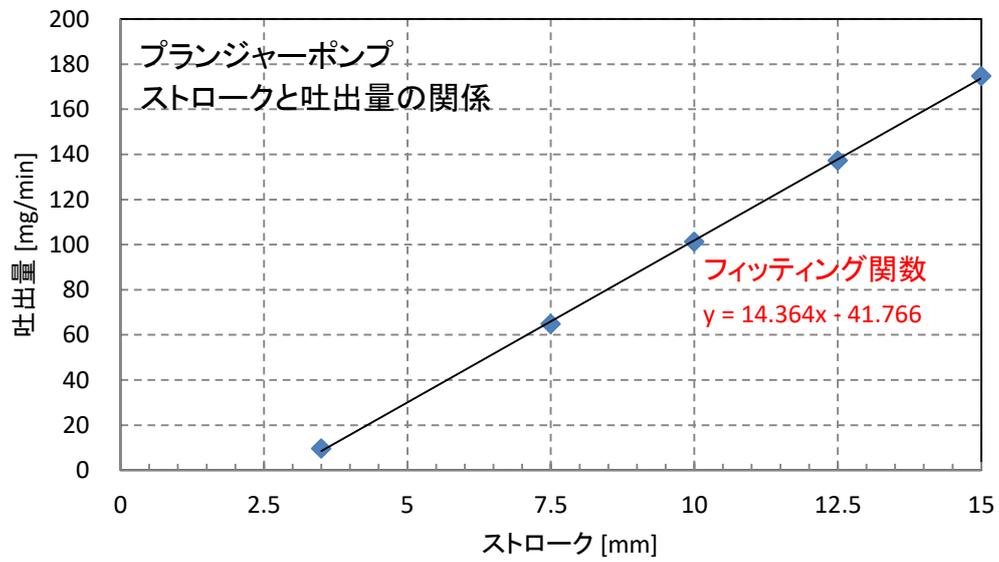


図 3-8 プランジャーポンプのストロークと吐出速度の関係

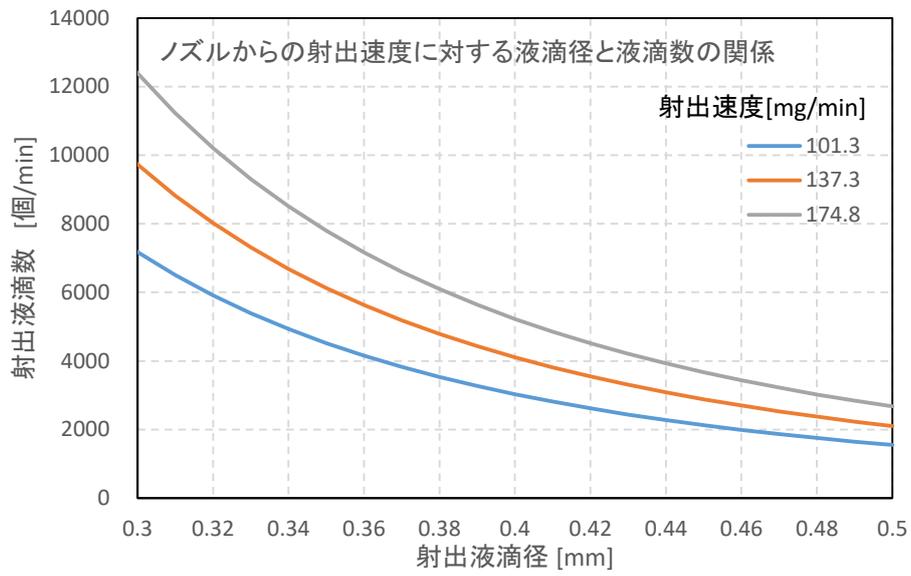


図 3-9 射出される液滴径と液滴数の関係

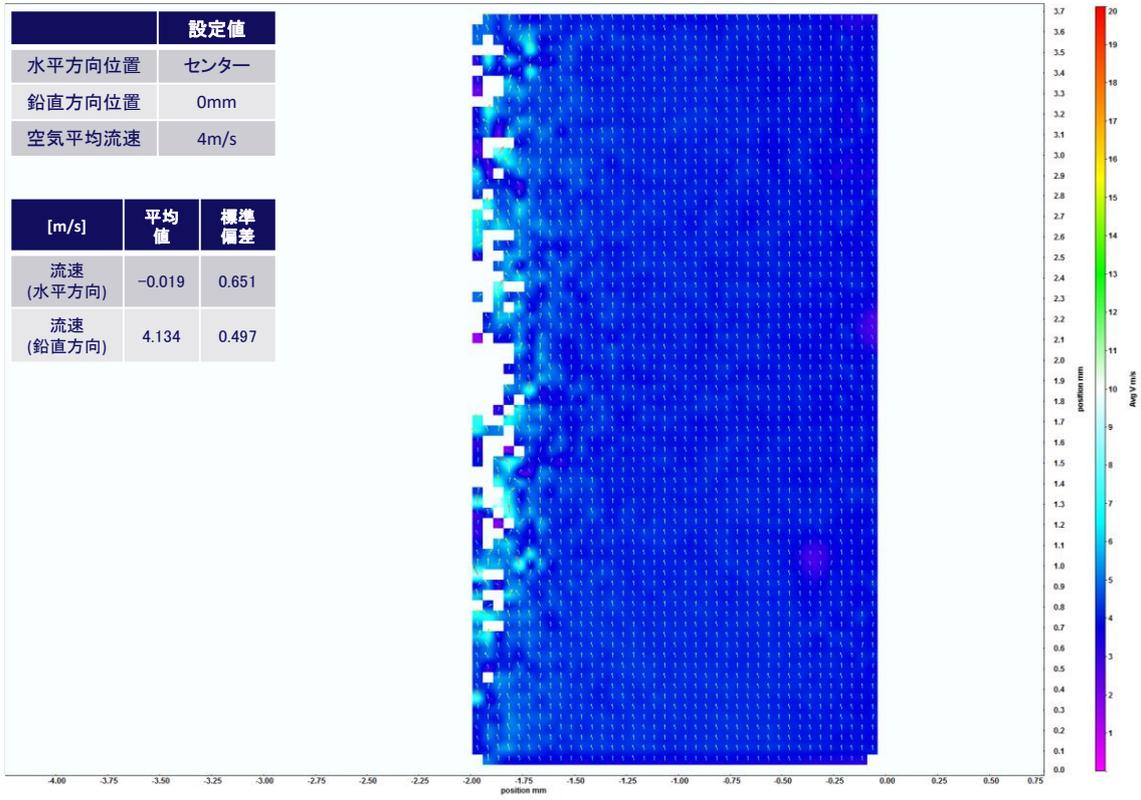


図 3-10 [1/18] 実験結果（空気流計測：ケース番号 PIV-01）

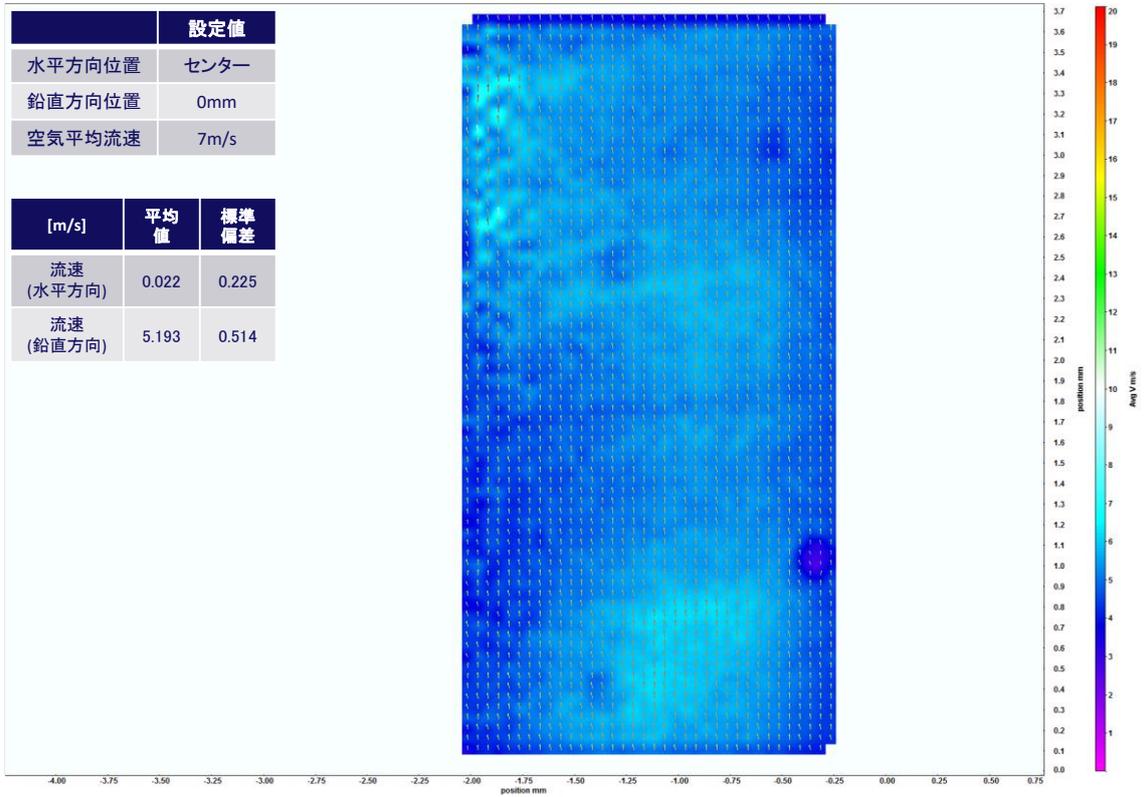


図 3-10 [2/18] 実験結果（空気流計測：ケース番号 PIV-02）

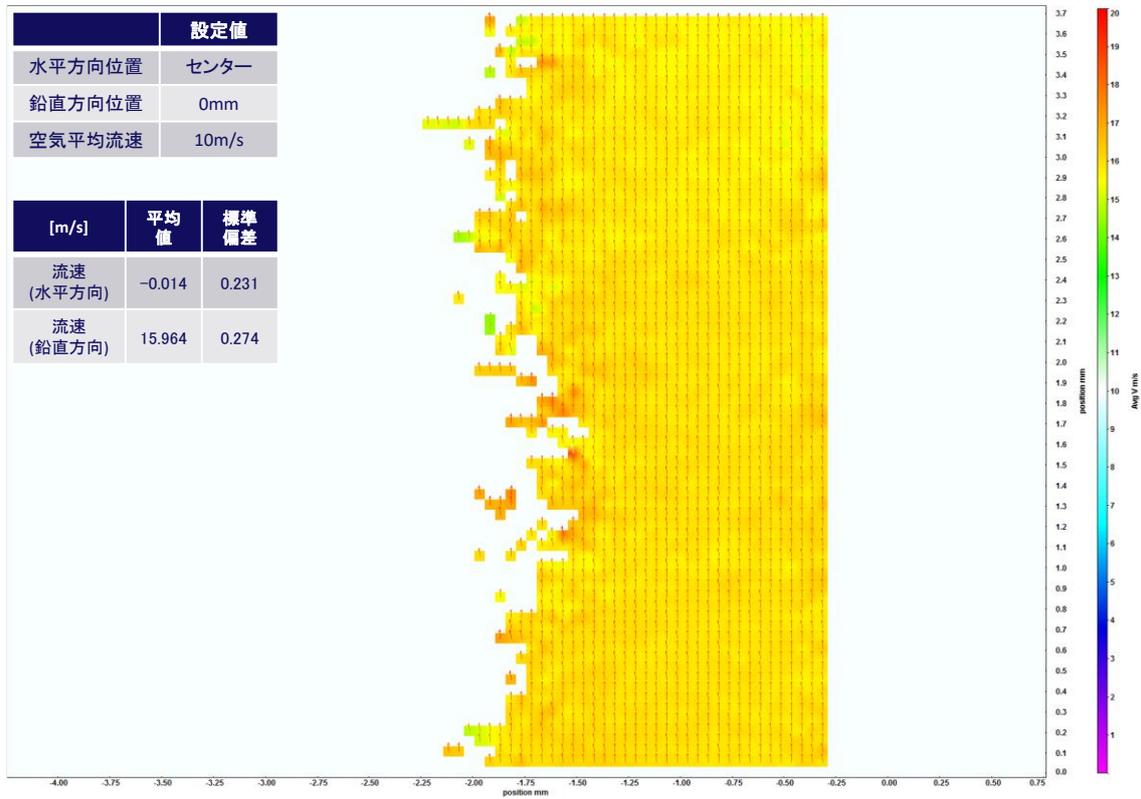


図 3-10 [3/18] 実験結果 (空気流計測 : ケース番号 PIV-03)

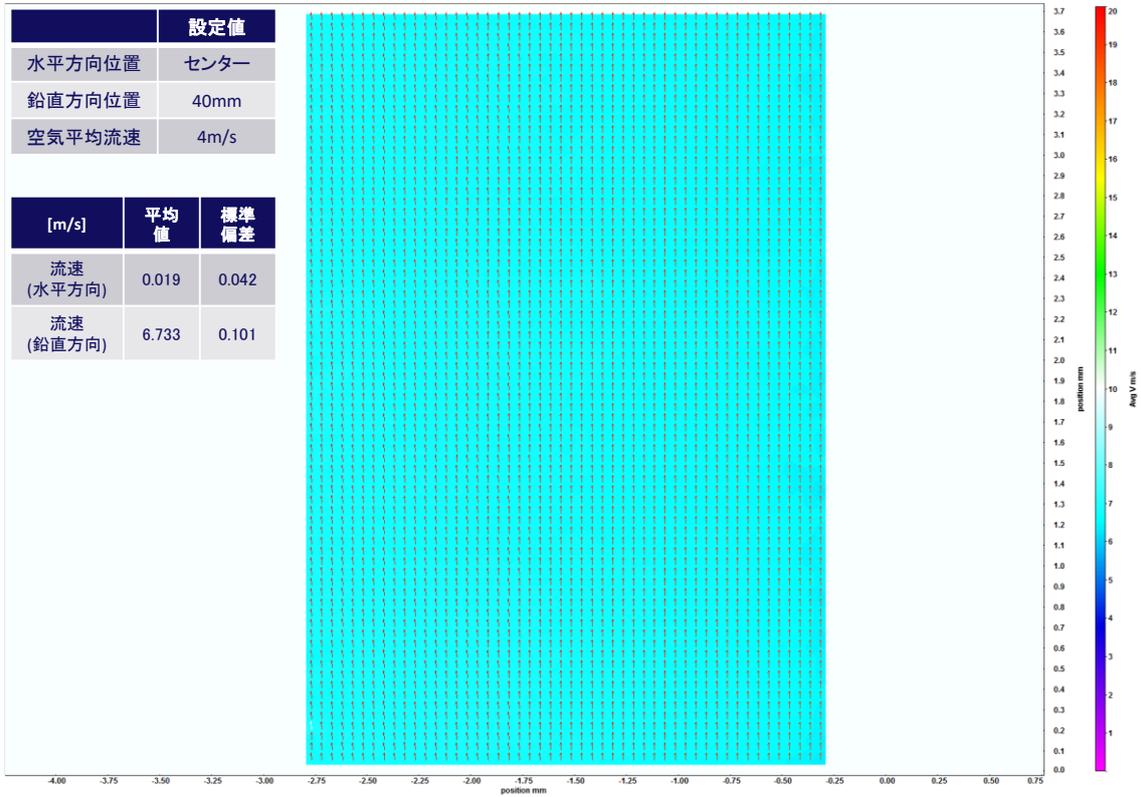


図 3-10 [4/18] 実験結果（空気流計測：ケース番号 PIV-04）

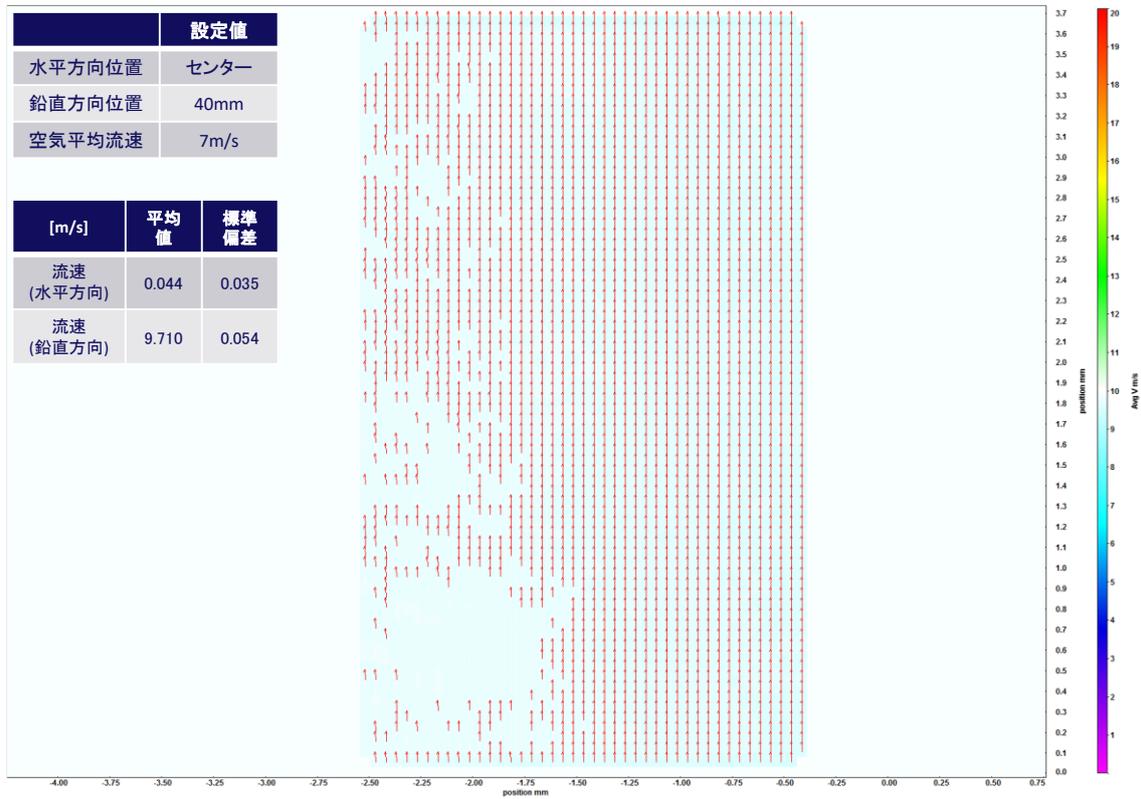


図 3-10 [5/18] 実験結果（空気流計測：ケース番号 PIV-05）

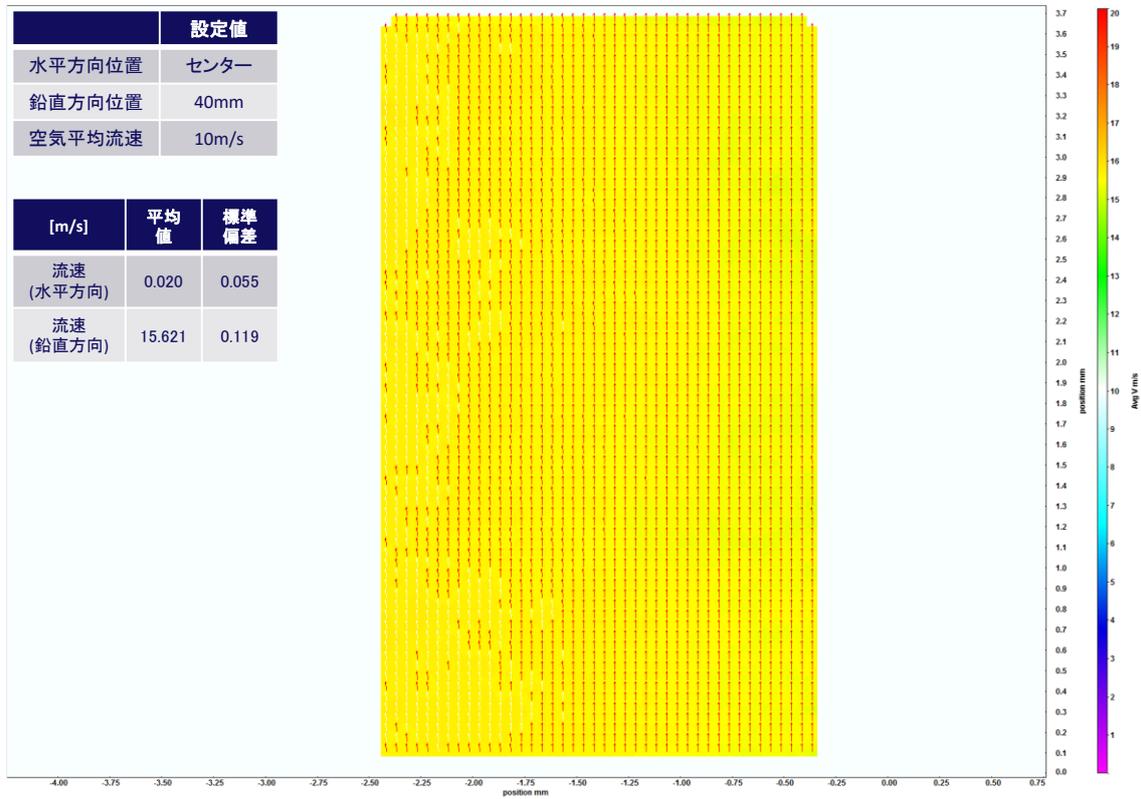


図 3-10 [6/18] 実験結果（空気流計測：ケース番号 PIV-06）

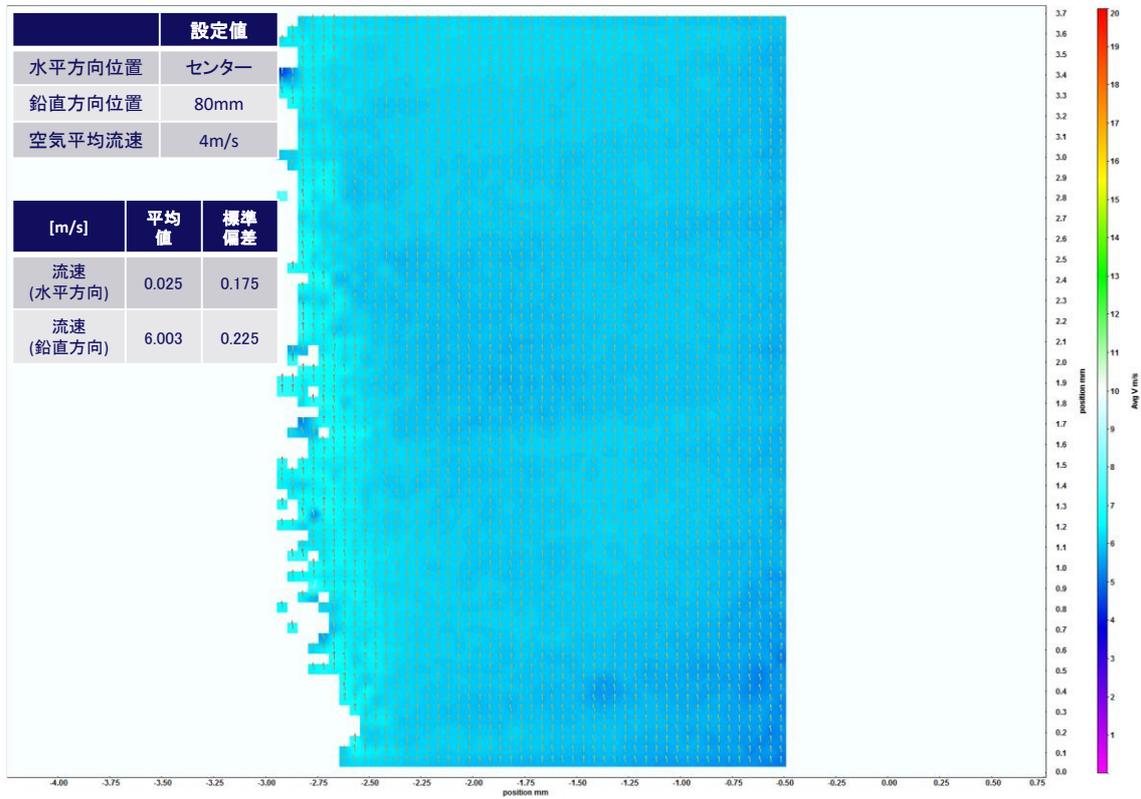


図 3-10 [7/18] 実験結果（空気流計測：ケース番号 PIV-07）

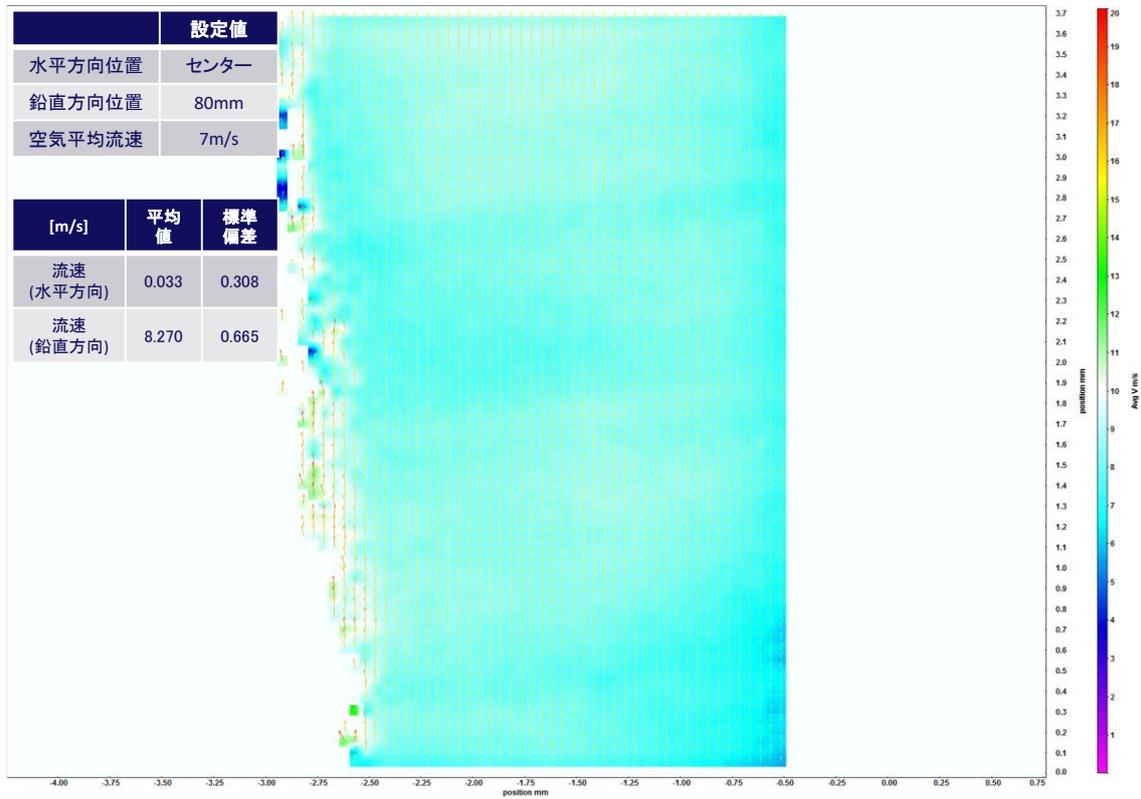


図 3-10 [8/18] 実験結果 (空気流計測 : ケース番号 PIV-08)

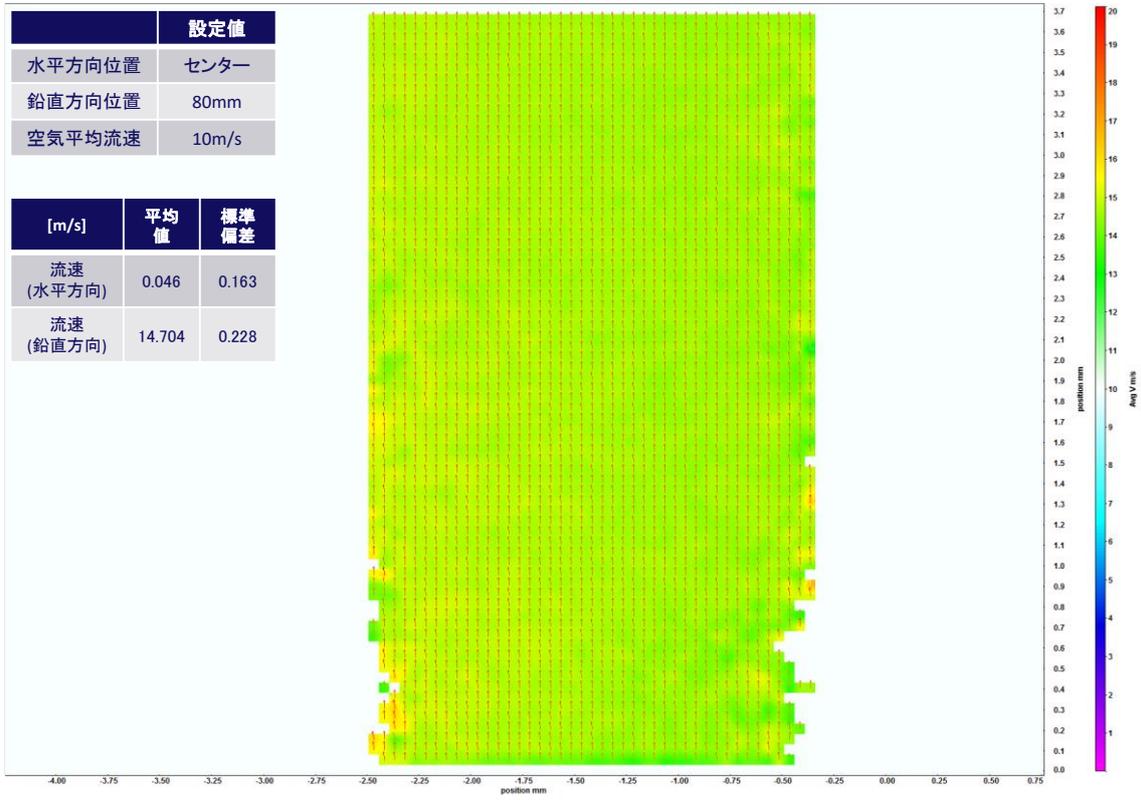


図 3-10 [9/18] 実験結果（空気流計測：ケース番号 PIV-09）

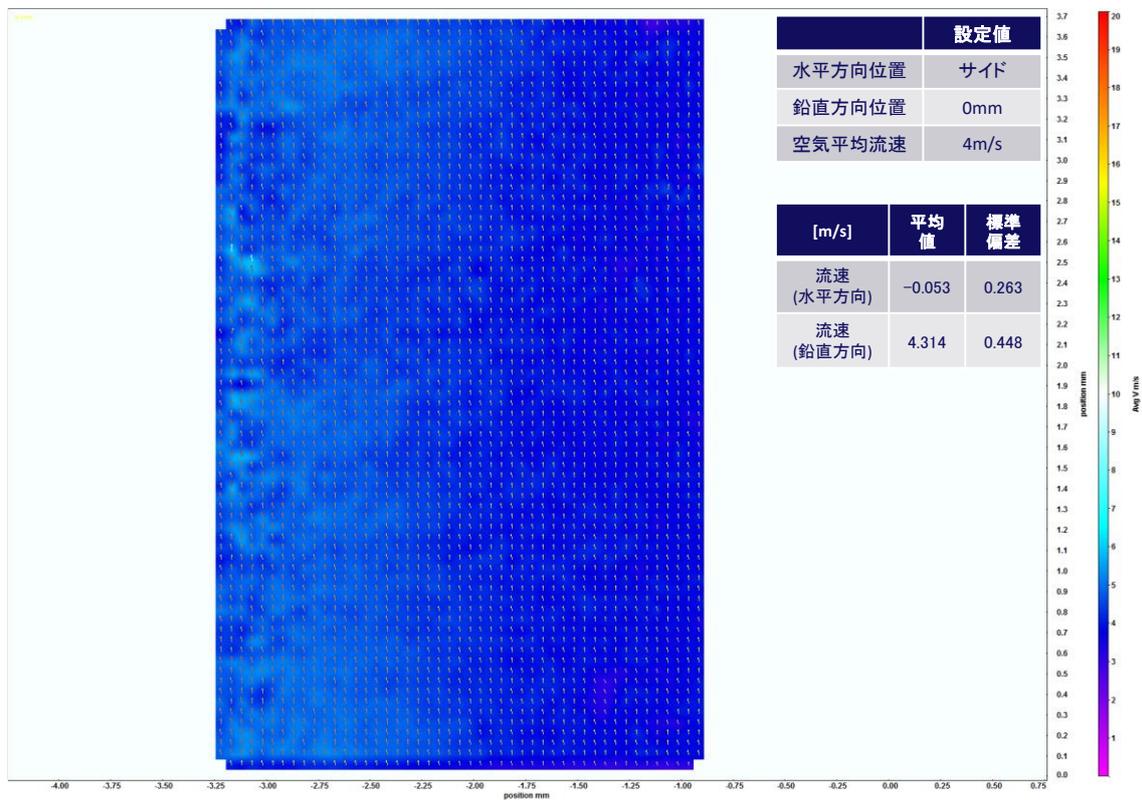


図 3-10 [10/18] 実験結果 (空気流計測 : ケース番号 PIV-10)

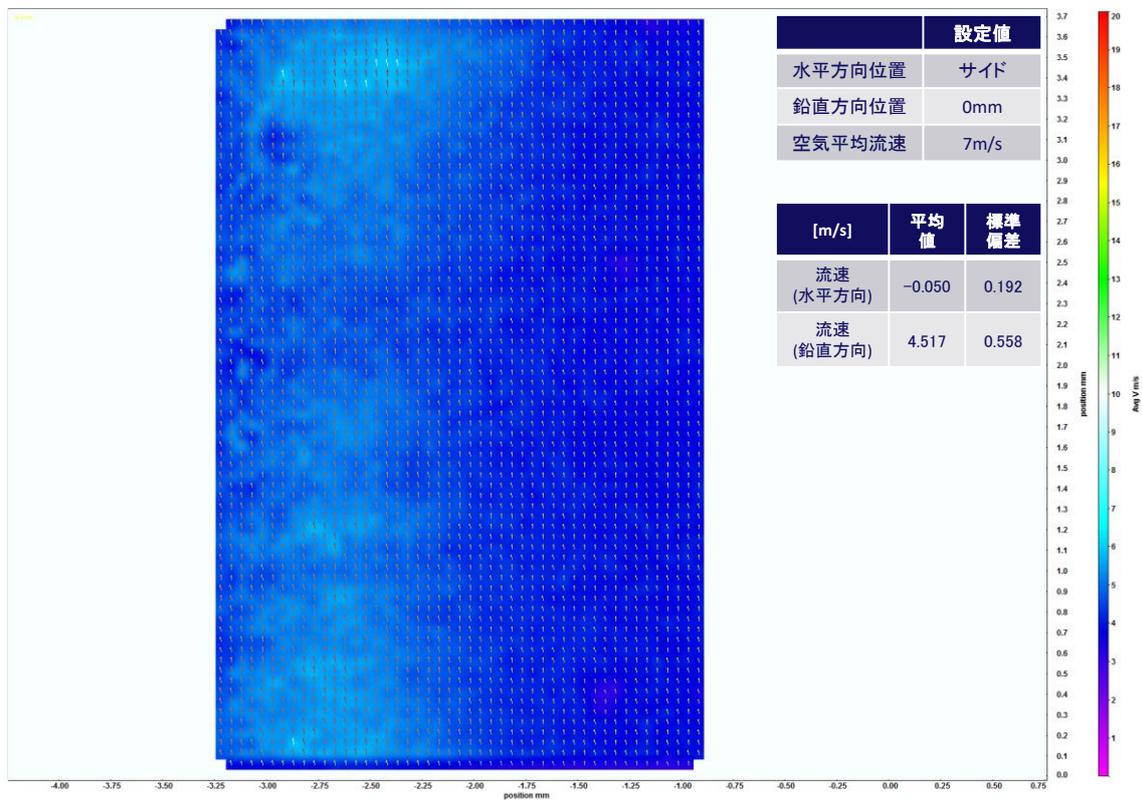


図 3-10 [11/18] 実験結果（空気流計測：ケース番号 PIV-11）

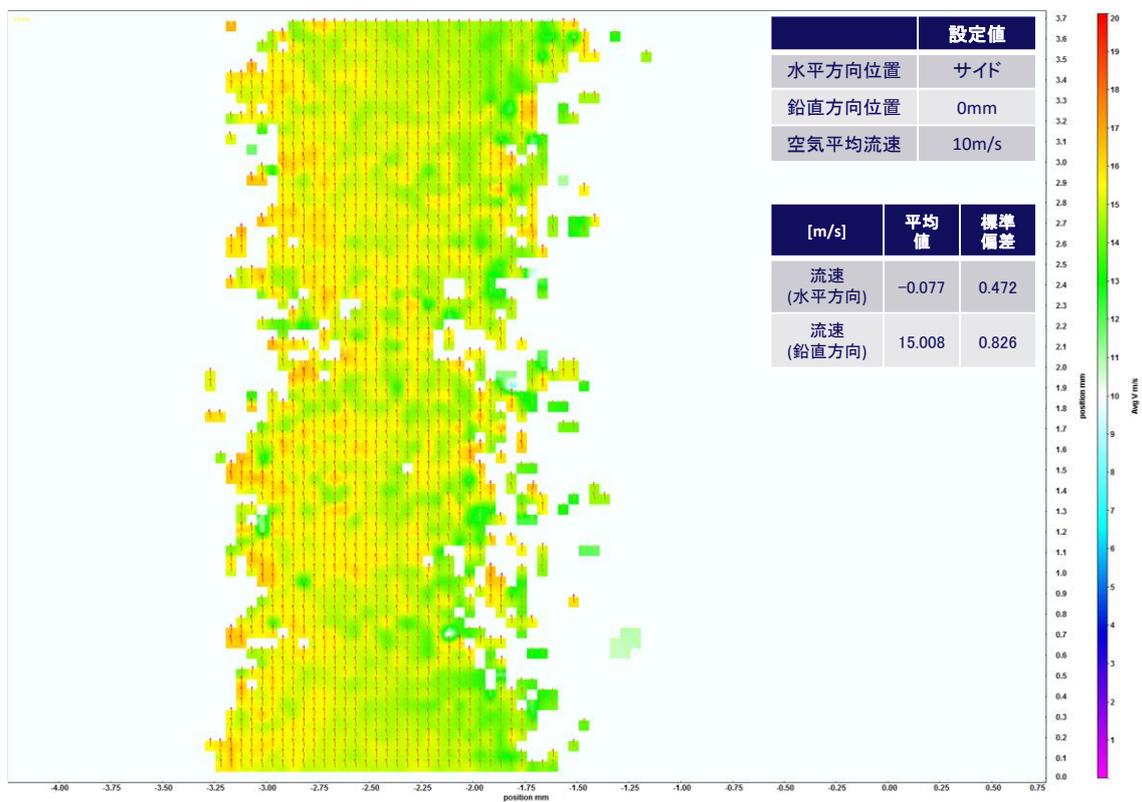


図 3-10 [12/18] 実験結果 (空気流計測 : ケース番号 PIV-12)

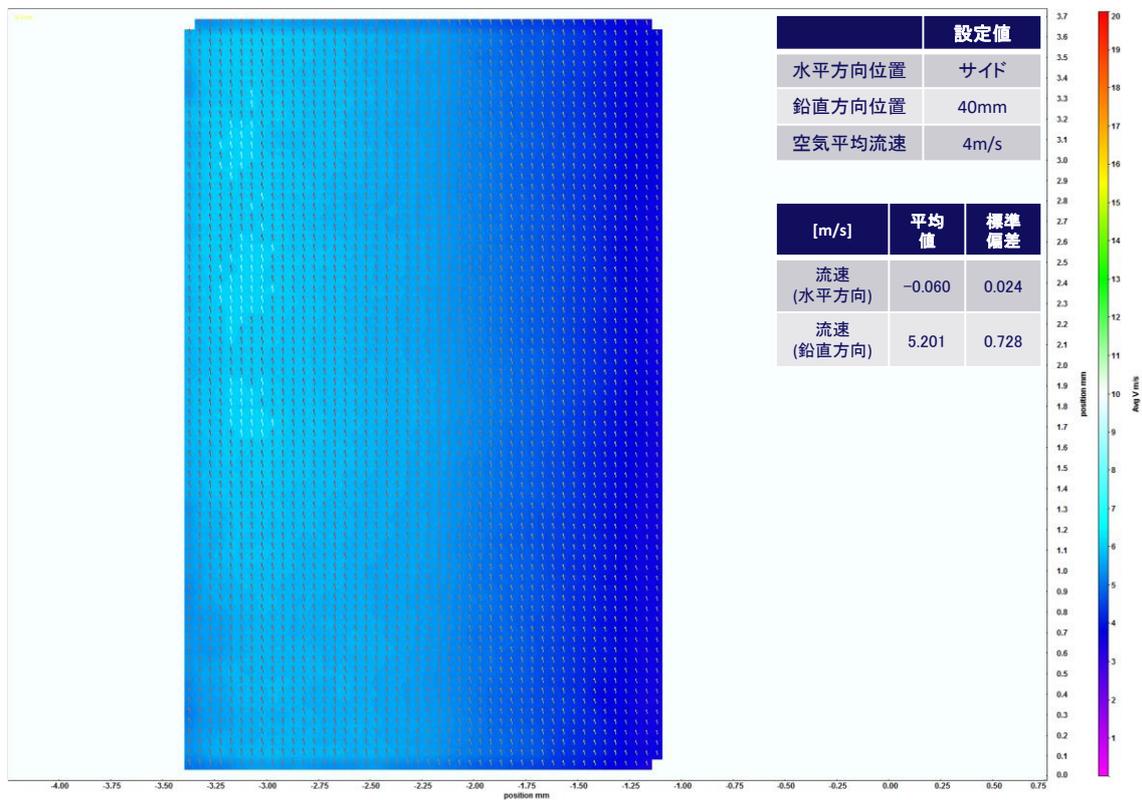


図 3-10 [13/18] 実験結果（空気流計測：ケース番号 PIV-13）

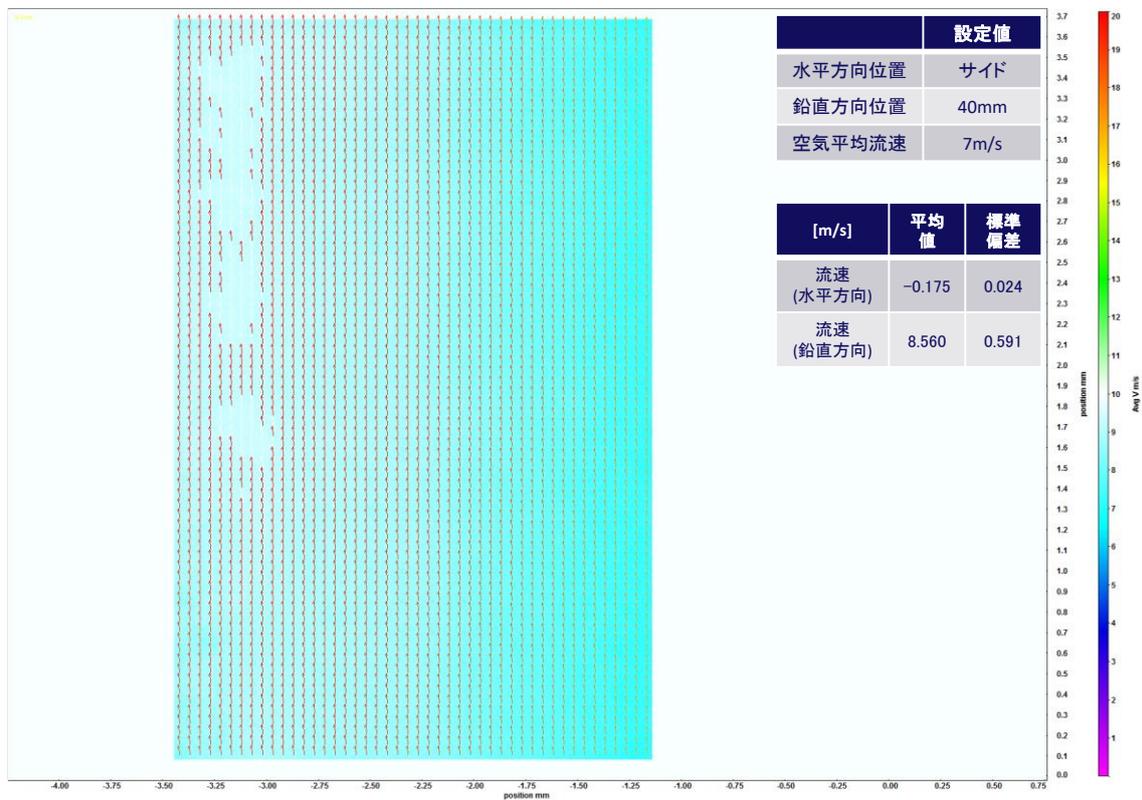


図 3-10 [14/18] 実験結果（空気流計測：ケース番号 PIV-14）

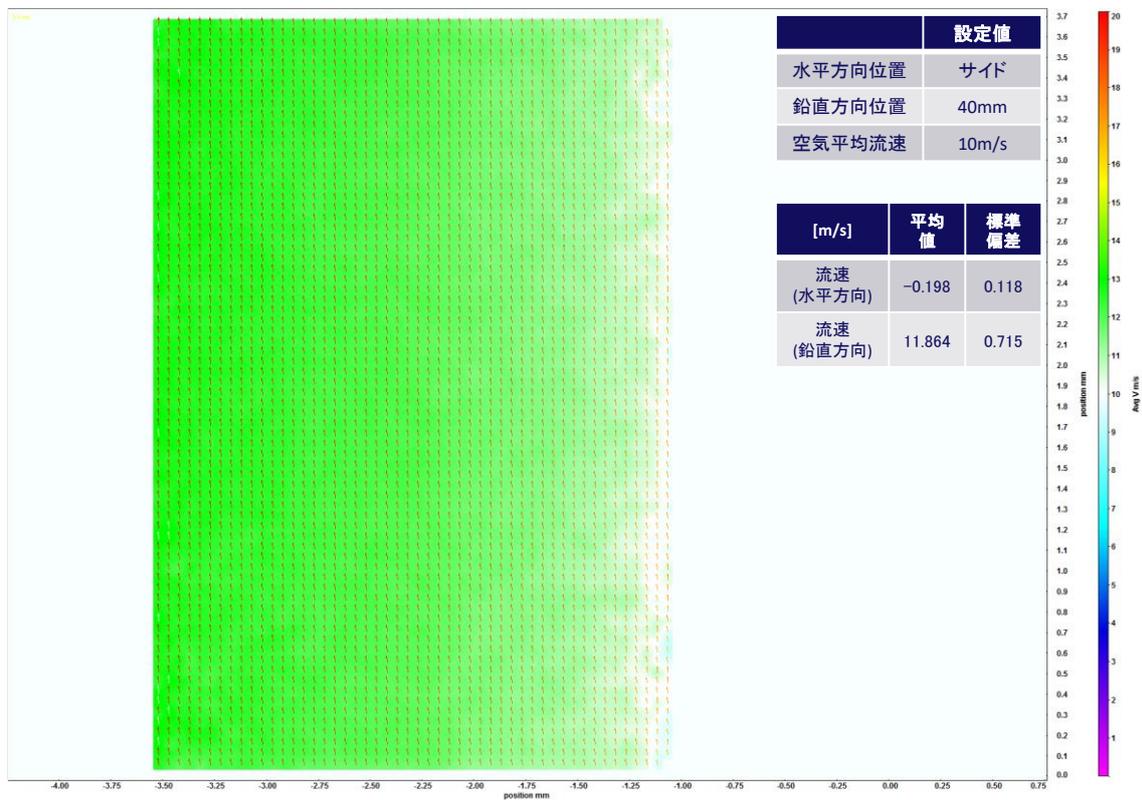


図 3-10 [15/18] 実験結果（空気流計測：ケース番号 PIV-15）

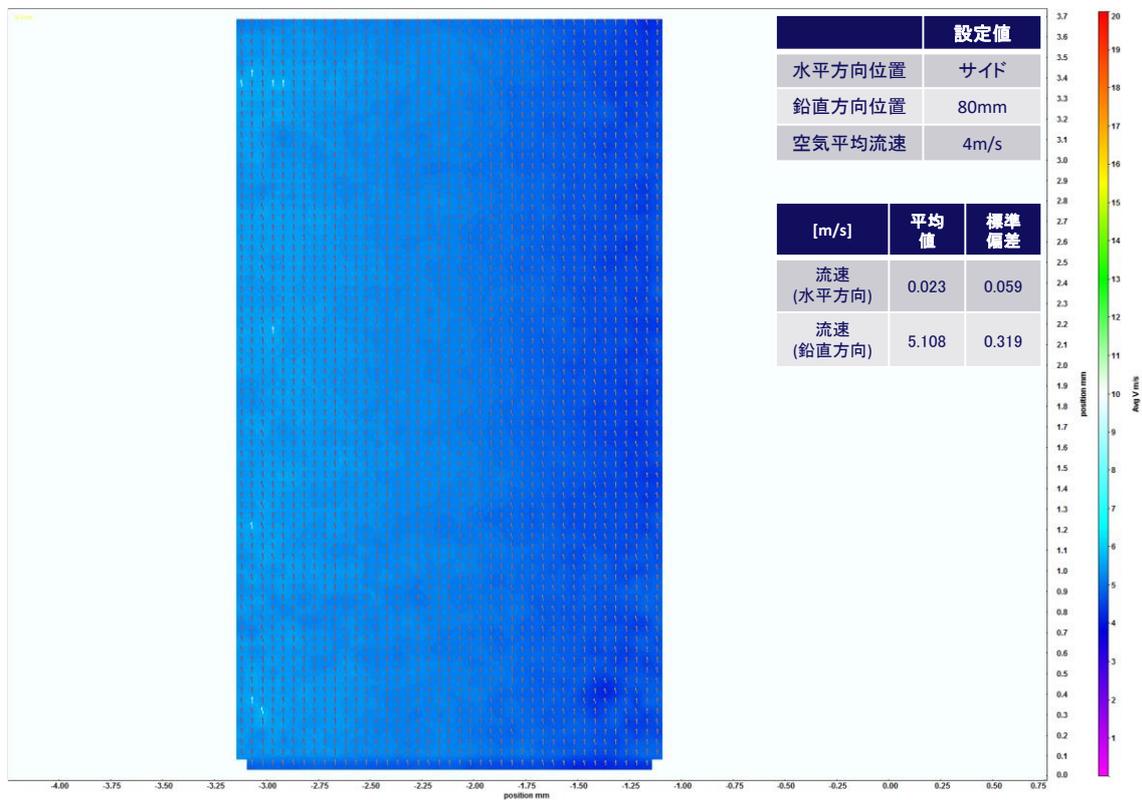


図 3-10 [16/18] 実験結果（空気流計測：ケース番号 PIV-16）

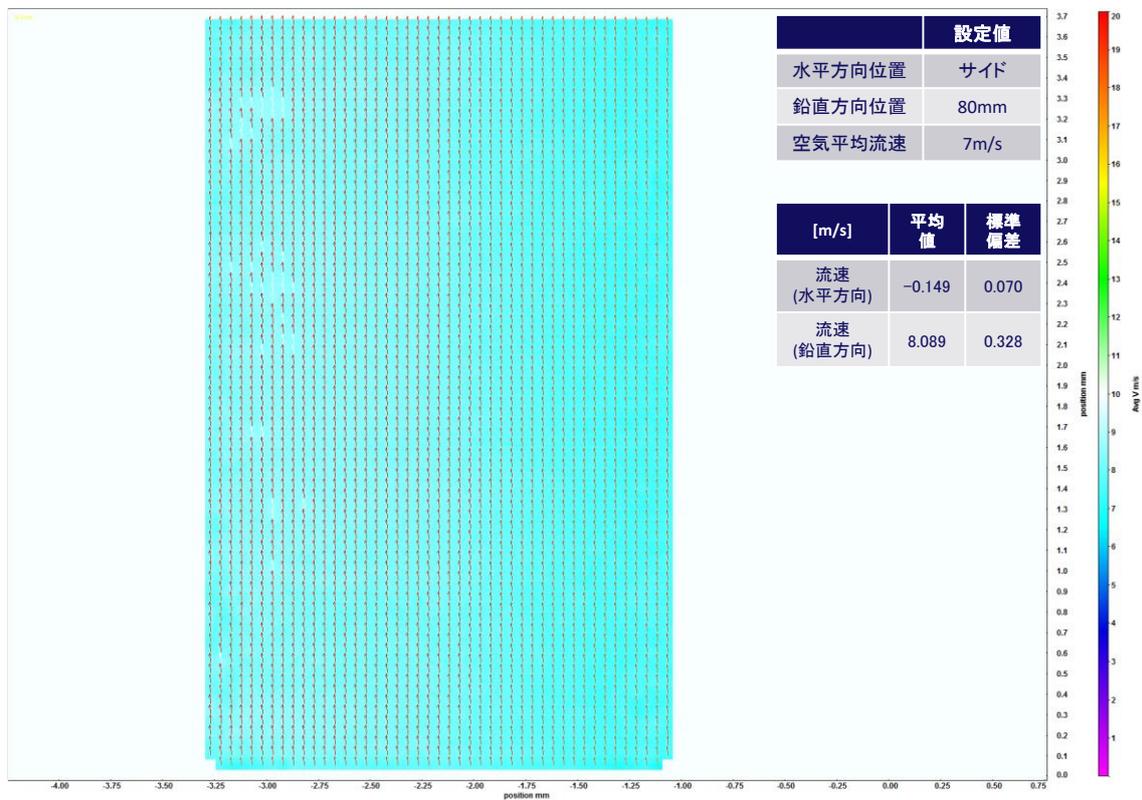


図 3-10 [17/18] 実験結果（空気流計測：ケース番号 PIV-17）

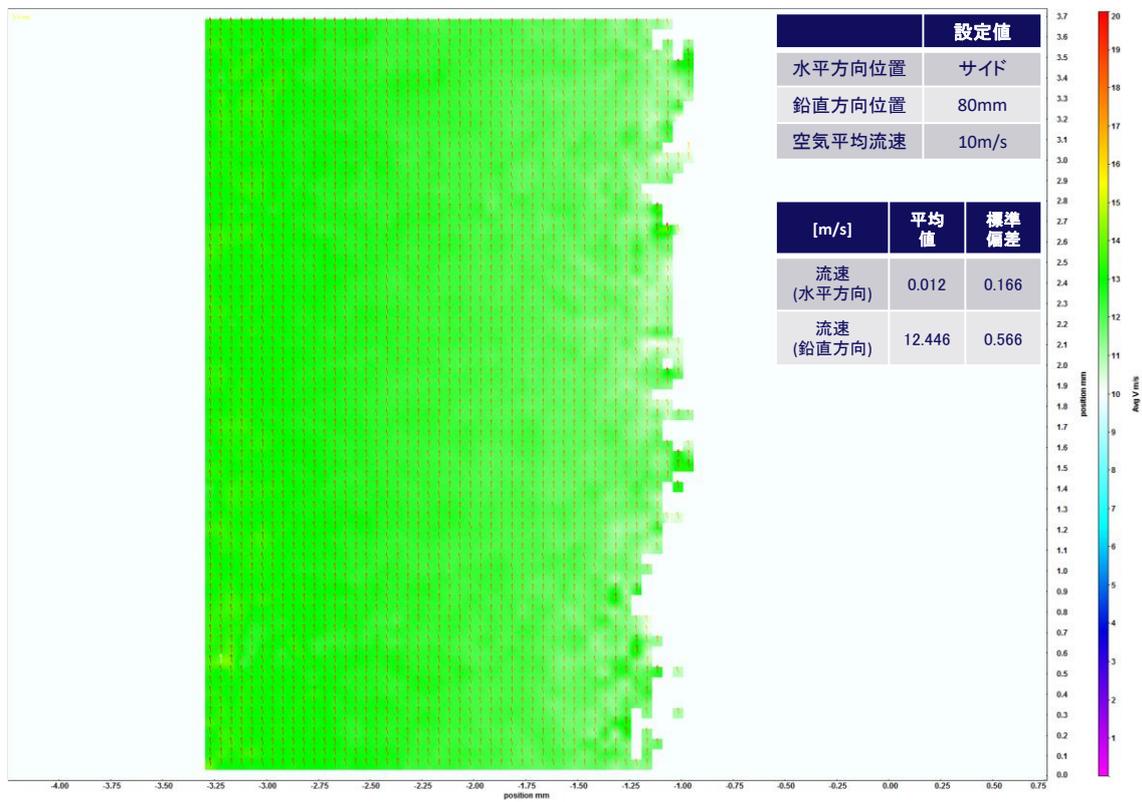


図 3-10 [18/18] 実験結果（空気流計測：ケース番号 PIV-18）

サブチャンネル	空気流速	液滴放出量
センター	4m/s	101.3mg/min

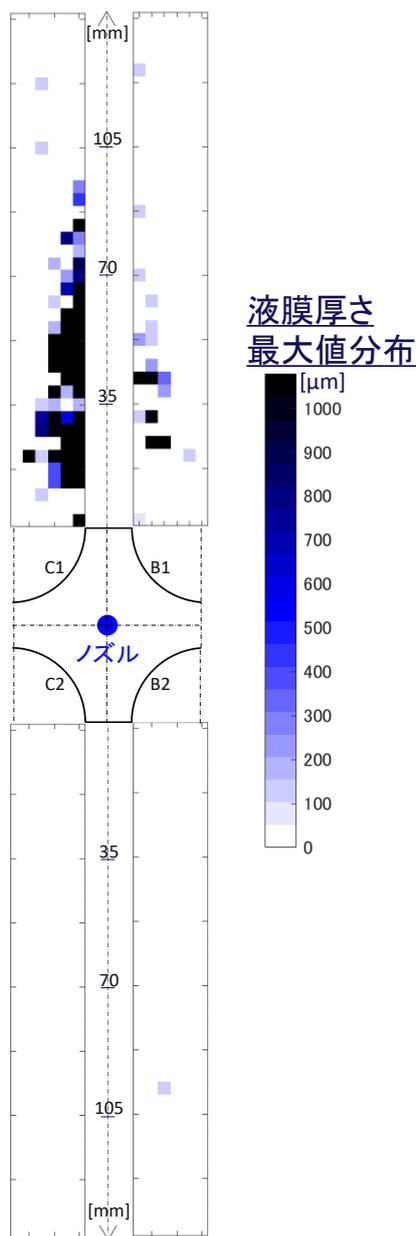


図 3-11 [1/8] 実験結果 (液膜計測 : ケース番号 LF-01)

サブチャンネル	空気流速	液滴放出量
センター	7m/s	101.3mg/min

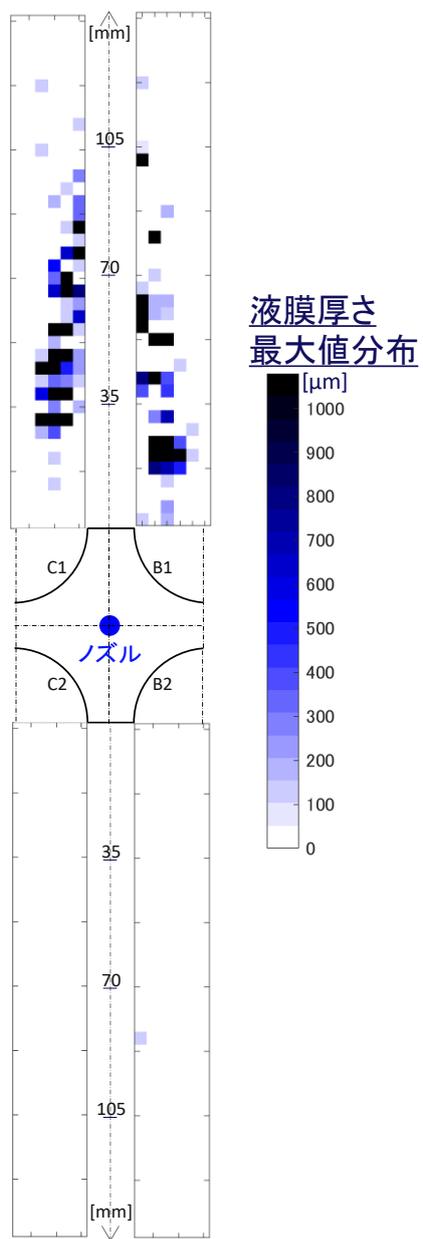


図 3-11 [2/8] 実験結果 (液膜計測 : ケース番号 LF-02)

サブチャンネル	空気流速	液滴放出量
センター	10m/s	101.3mg/min

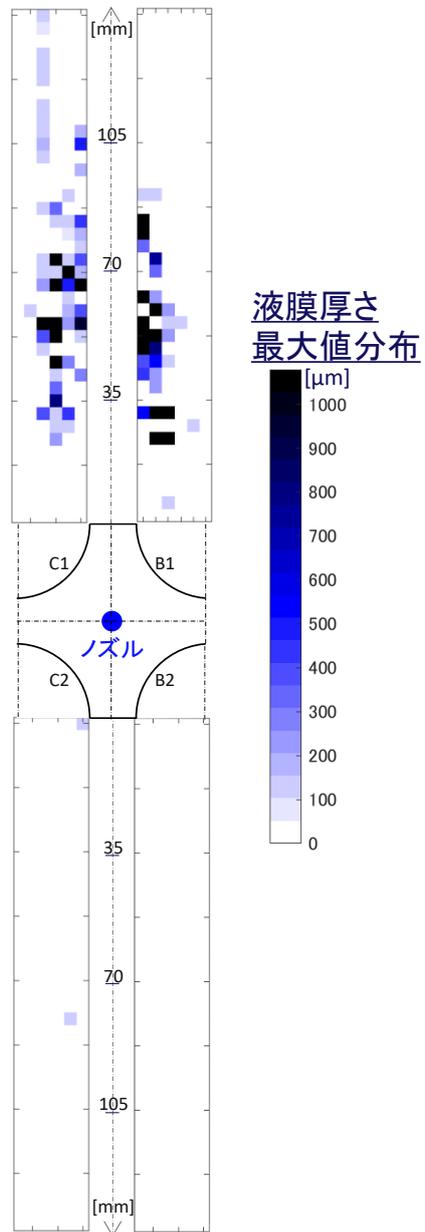


図 3-11 [3/8] 実験結果 (液膜計測 : ケース番号 LF-03)

サブチャンネル	空気流速	液滴放出量
センター	10m/s	137.3mg/min

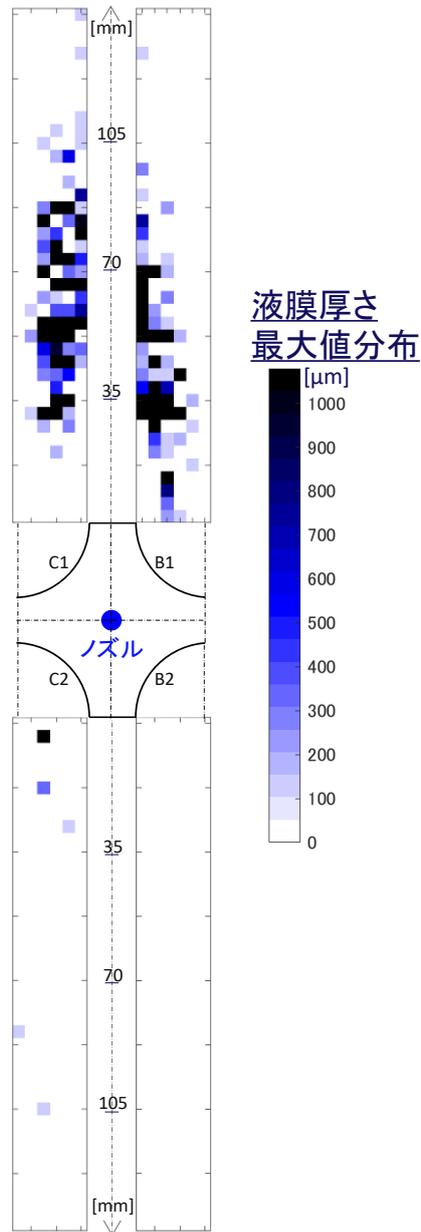


図 3-11 [4/8] 実験結果（液膜計測：ケース番号 LF-04）

サブチャンネル	空気流速	液滴放出量
センター	10m/s	174.8mg/min

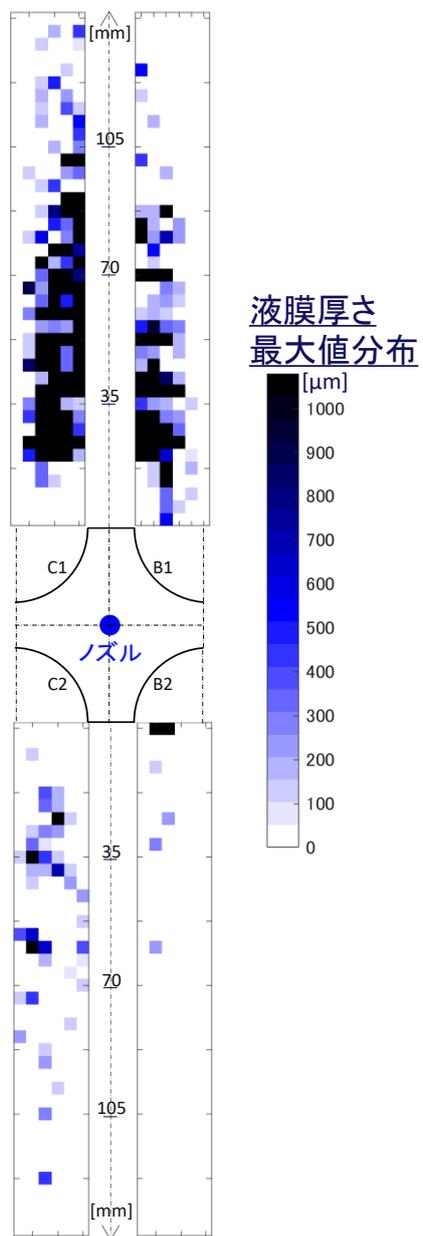


図 3-11 [5/8] 実験結果（液膜計測：ケース番号 LF-05）

サブチャンネル	空気流速	液滴放出量
サイド	4m/s	101.3mg/min

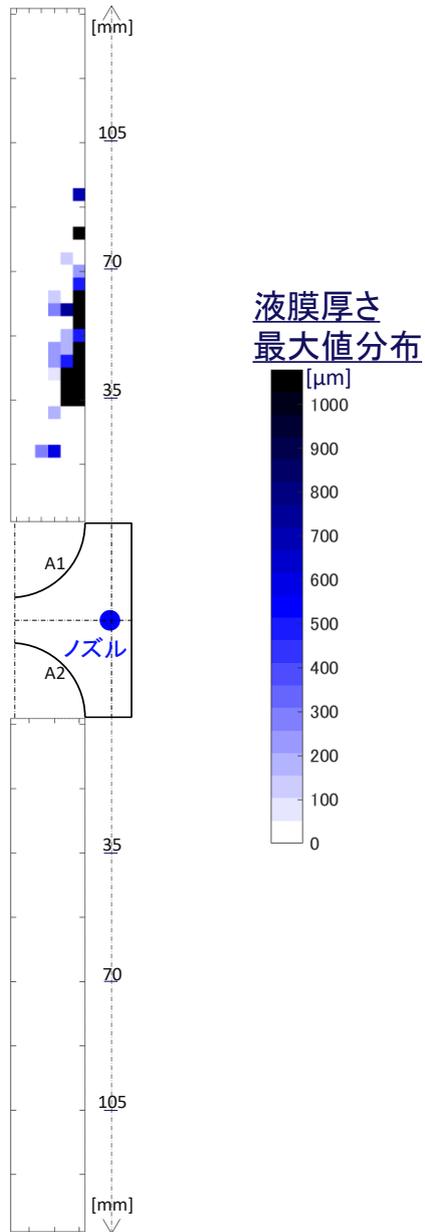


図 3-11 [6/8] 実験結果 (液膜計測 : ケース番号 LF-06)

サブチャンネル	空気流速	液滴放出量
サイド	7m/s	101.3mg/min

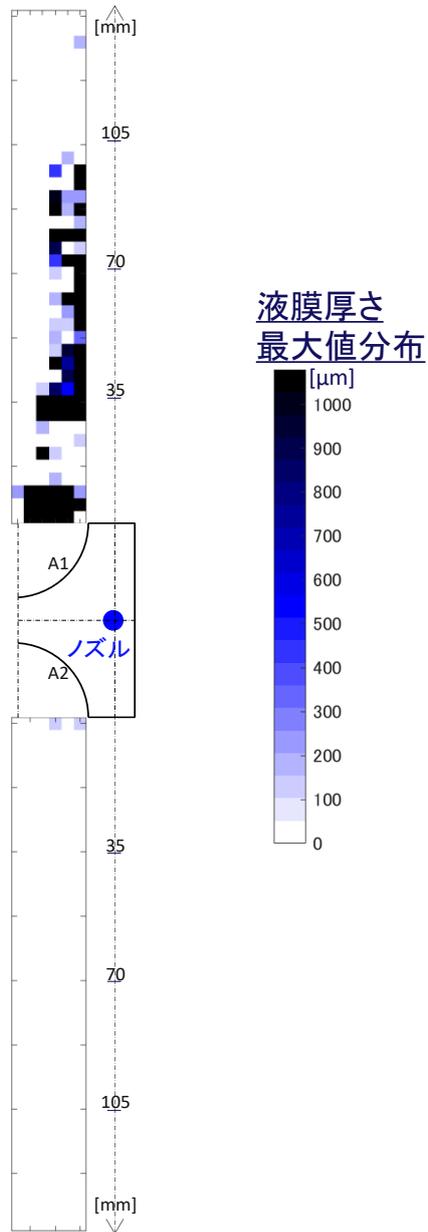


図 3-11 [7/8] 実験結果 (液膜計測：ケース番号 LF-07)

サブチャンネル	空気流速	液滴放出量
サイド	10m/s	101.3mg/min

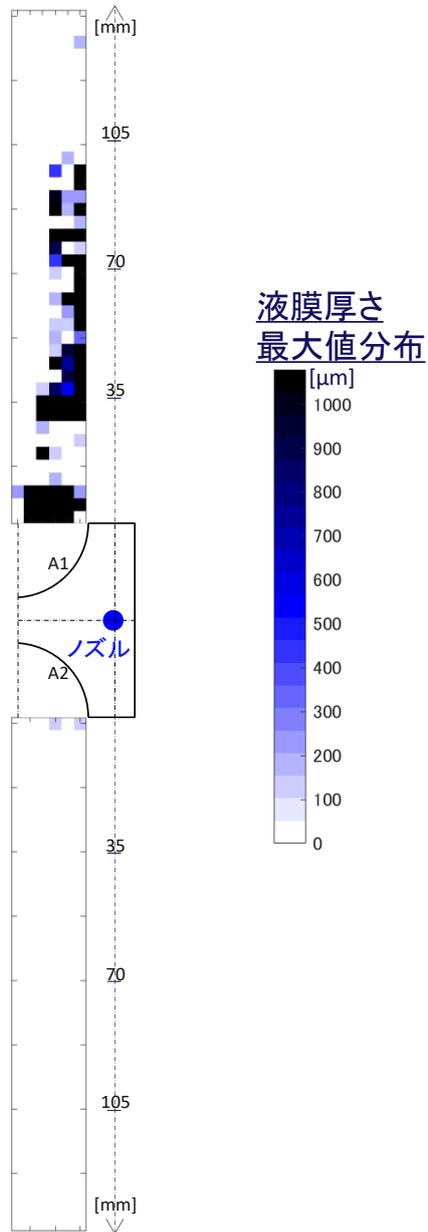


図 3-11 [8/8] 実験結果 (液膜計測 : ケース番号 LF-08)

サブチャンネル	空気流速	液滴放出量
センター	4m/s	101.3mg/min

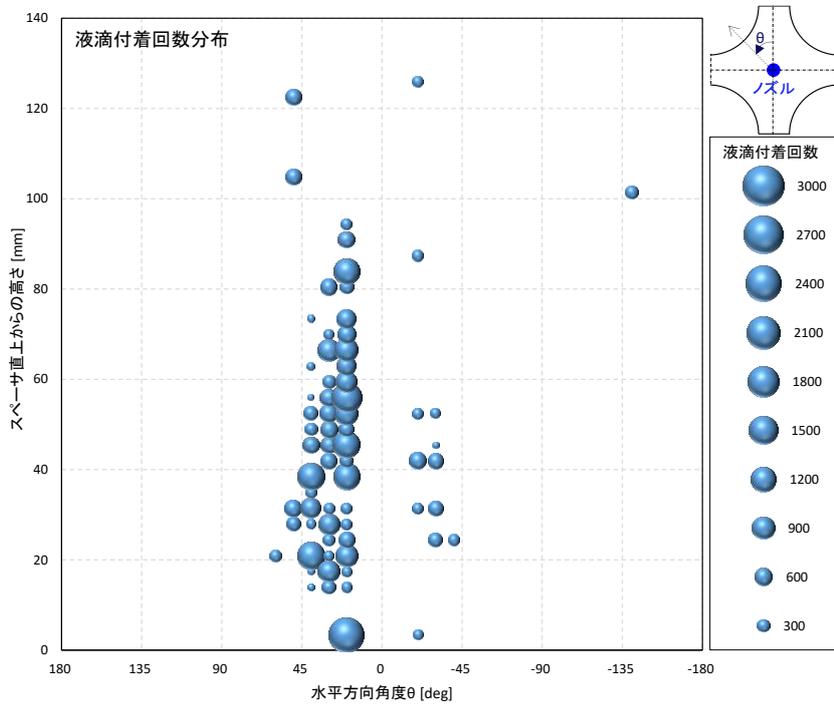
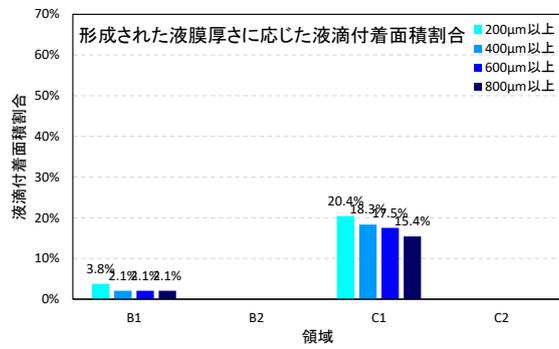


図 3-12 [1/8] 実験結果 (液膜計測 : ケース番号 LF-01)

サブチャンネル	空気流速	液滴放出量
センター	7m/s	101.3mg/min

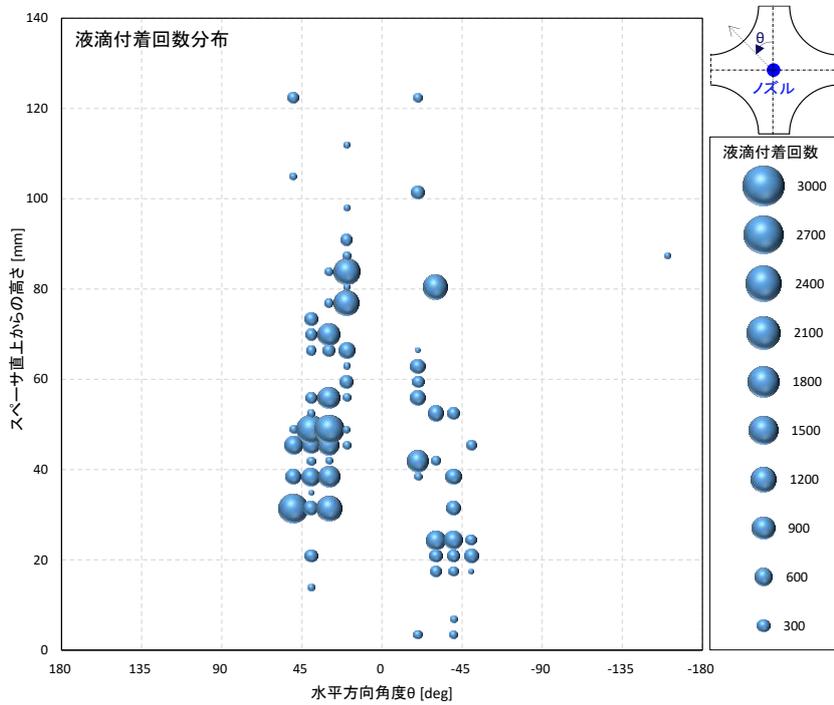
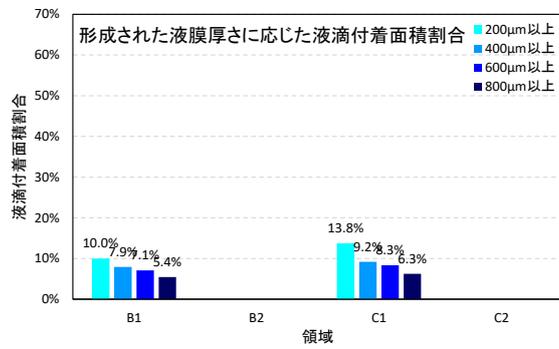


図 3-12 [2/8] 実験結果 (液膜計測：ケース番号 LF-02)

サブチャンネル	空気流速	液滴放出量
センター	10m/s	101.3mg/min

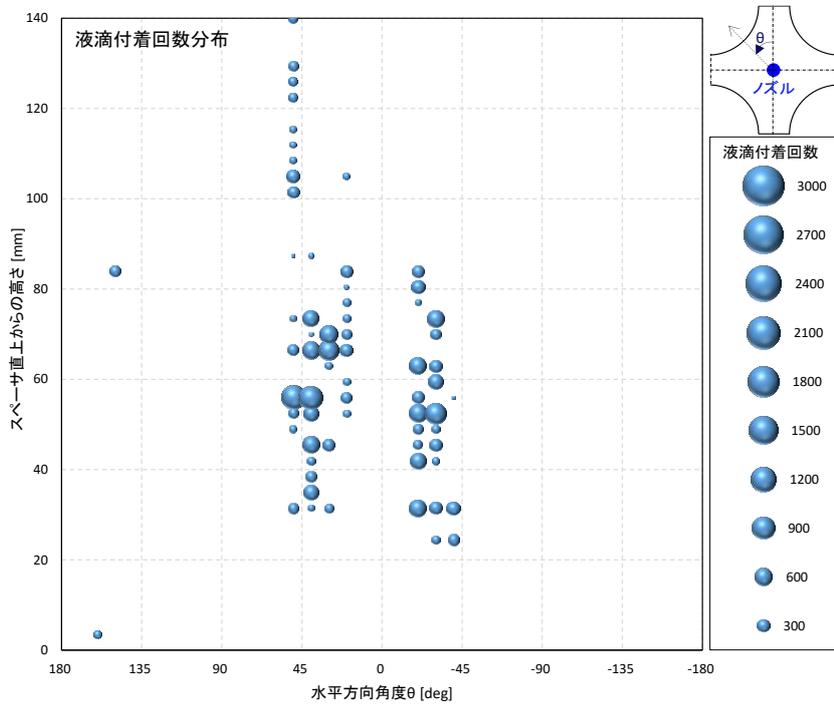
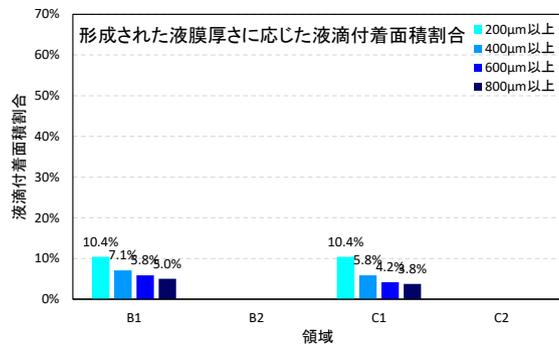


図 3-12 [3/8] 実験結果 (液膜計測 : ケース番号 LF-03)

サブチャンネル	空気流速	液滴放出量
センター	10m/s	137.3mg/min

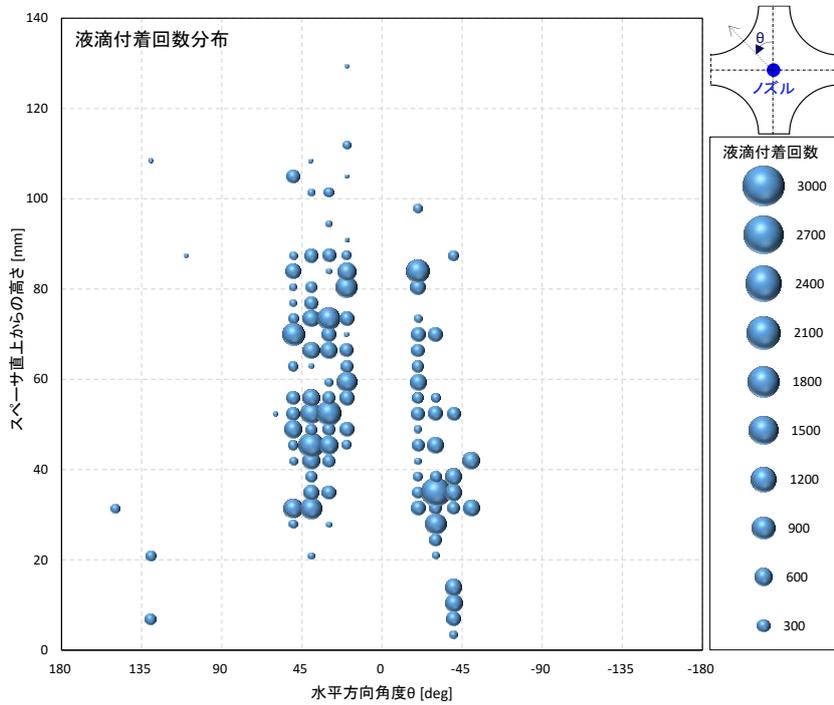
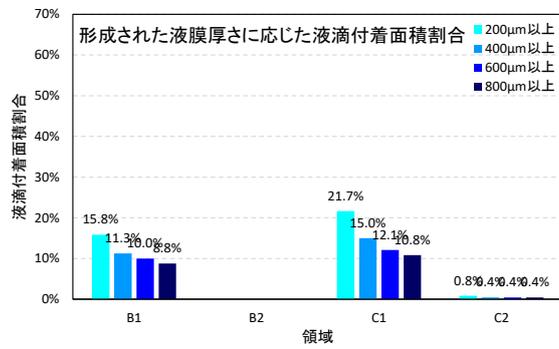


図 3-12 [4/8] 実験結果 (液膜計測：ケース番号 LF-04)

サブチャンネル	空気流速	液滴放出量
センター	10m/s	174.8mg/min

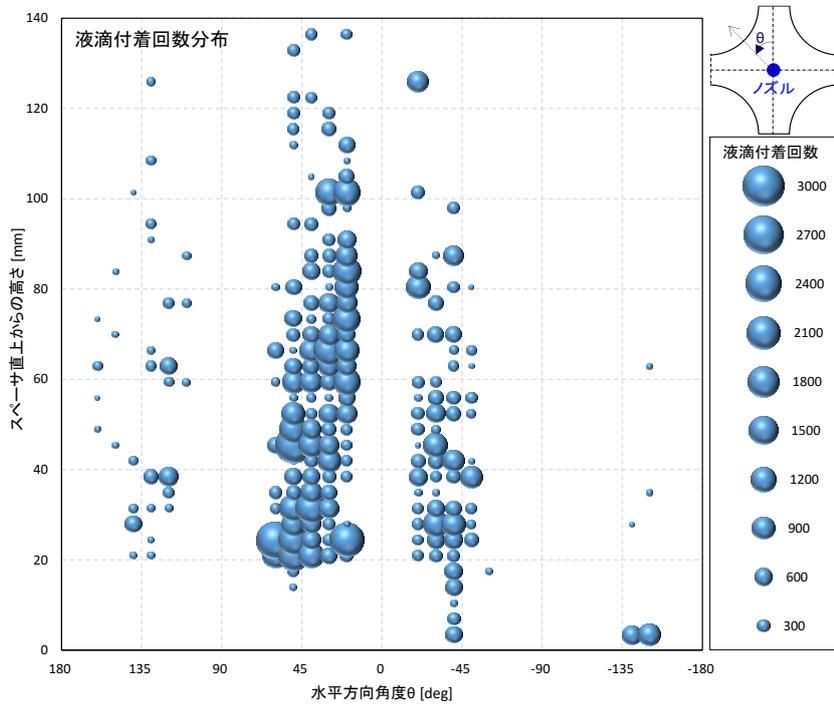
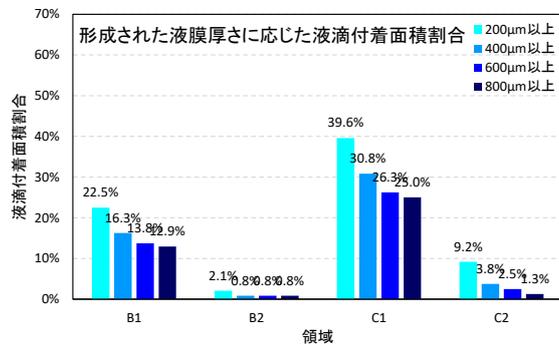


図 3-12 [5/8] 実験結果 (液膜計測 : ケース番号 LF-05)

サブチャンネル	空気流速	液滴放出量
サイド	4m/s	101.3mg/min

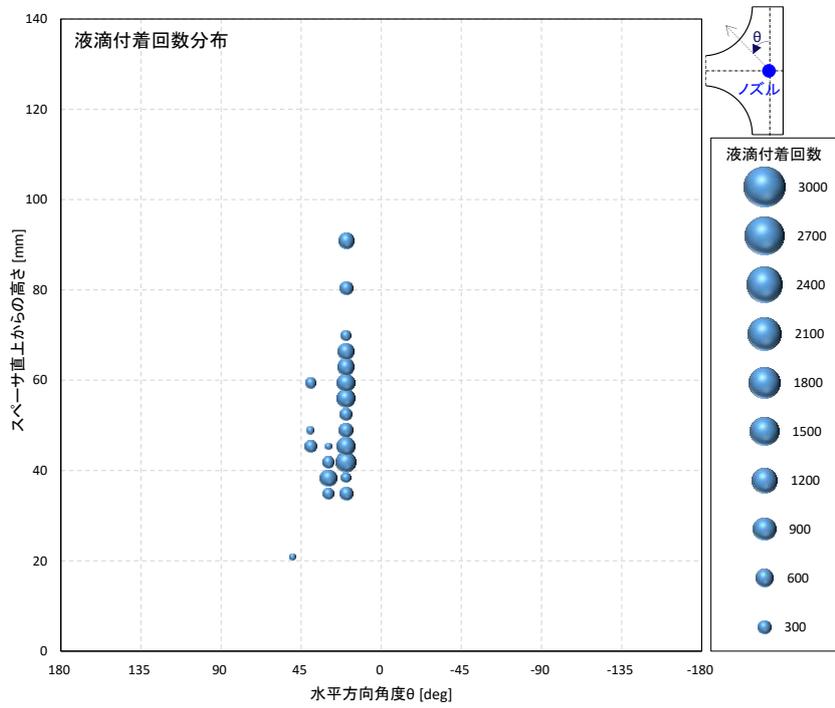
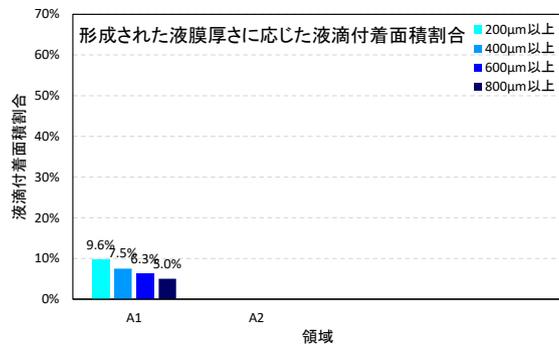


図 3-12 [6/8] 実験結果（液膜計測：ケース番号 LF-06）

サブチャンネル	空気流速	液滴放出量
サイド	7m/s	101.3mg/min

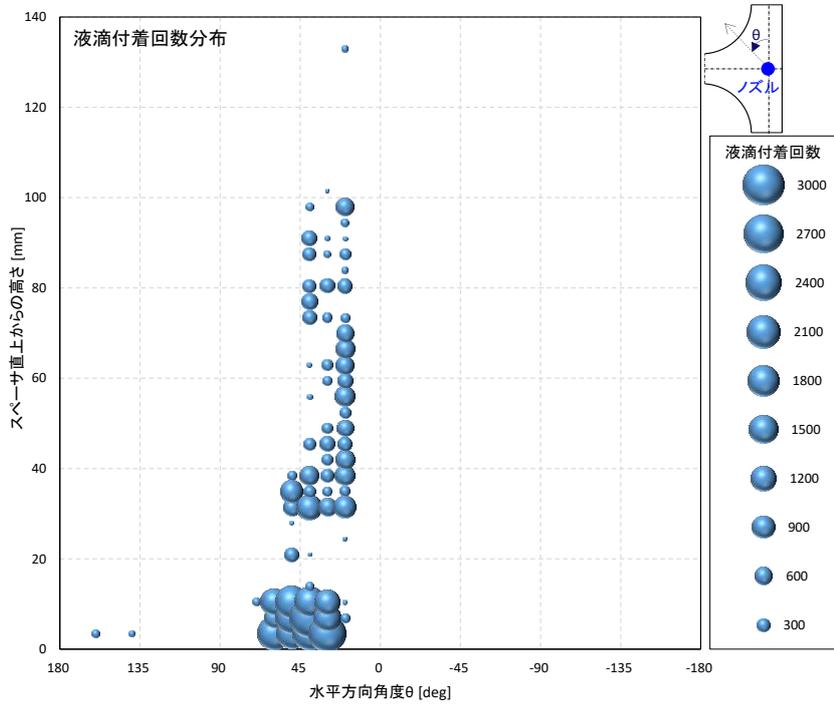
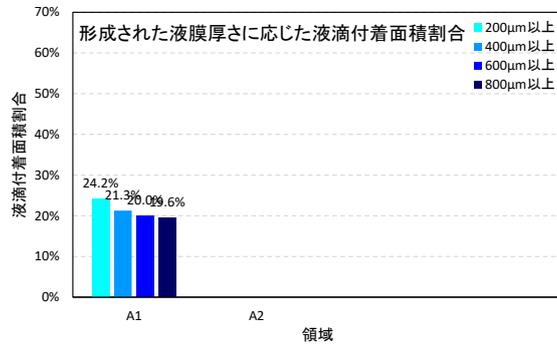


図 3-12 [7/8] 実験結果（液膜計測：ケース番号 LF-07）

サブチャンネル	空気流速	液滴放出量
サイド	10m/s	101.3mg/min

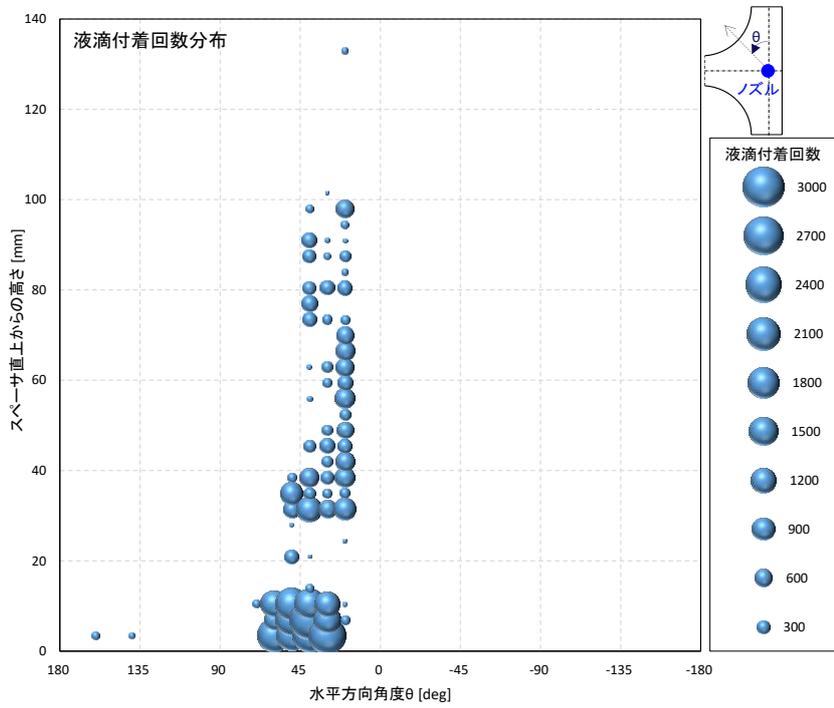
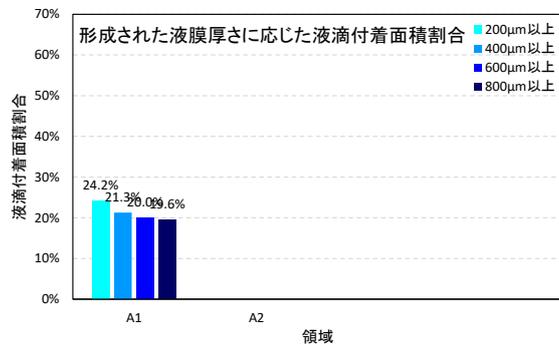


図 3-12 [8/8] 実験結果 (液膜計測 : ケース番号 LF-08)

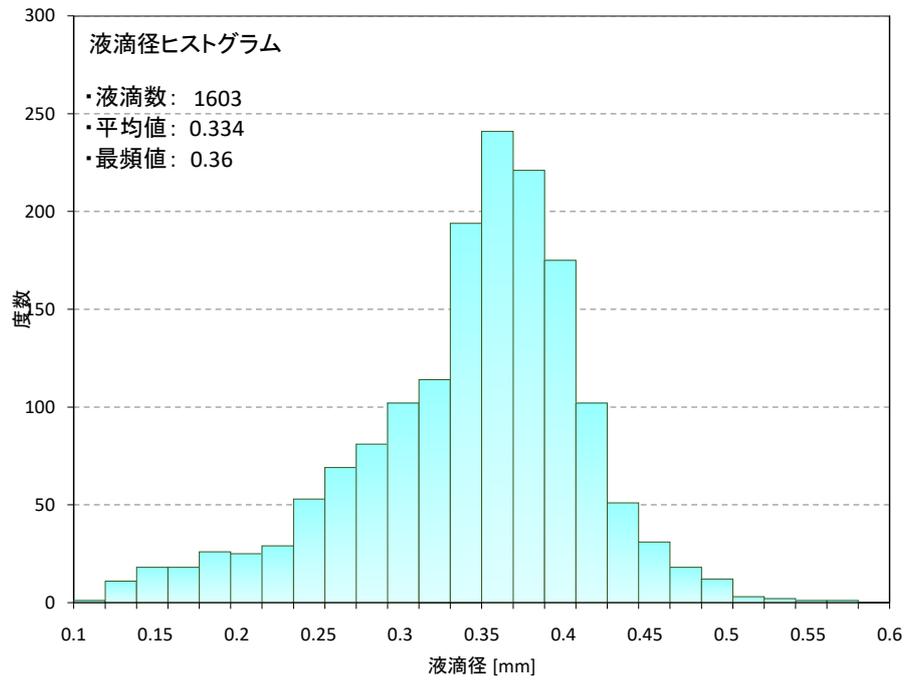


図 3-13 実験結果 (液滴計測: 液滴径)

ノズル位置	鉛直方向位置	空気流速	計測液滴数 水平(流路短辺)方向	計測液滴数 水平(流路長辺)方向
センター	0mm	4m/s	80	89

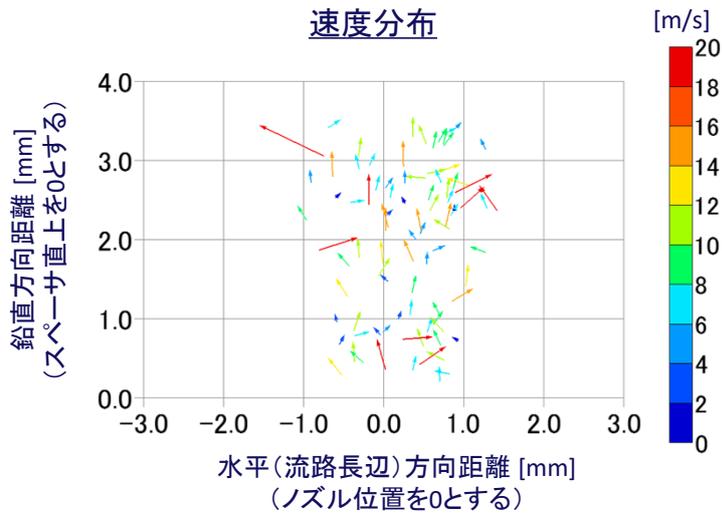
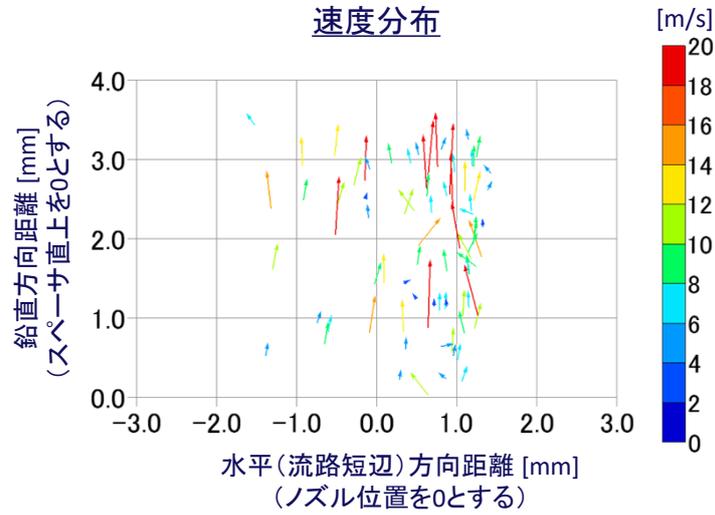


図 3-14 [1/18] 実験結果 (液滴計測：ケース番号 PM-01)

ノズル位置	鉛直方向位置	空気流速	計測液滴数 水平(流路短辺)方向	計測液滴数 水平(流路長辺)方向
センター	0mm	7m/s	70	115

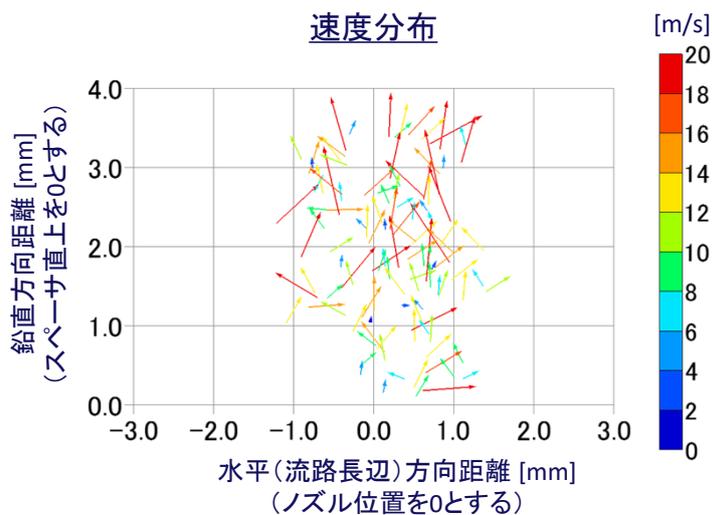
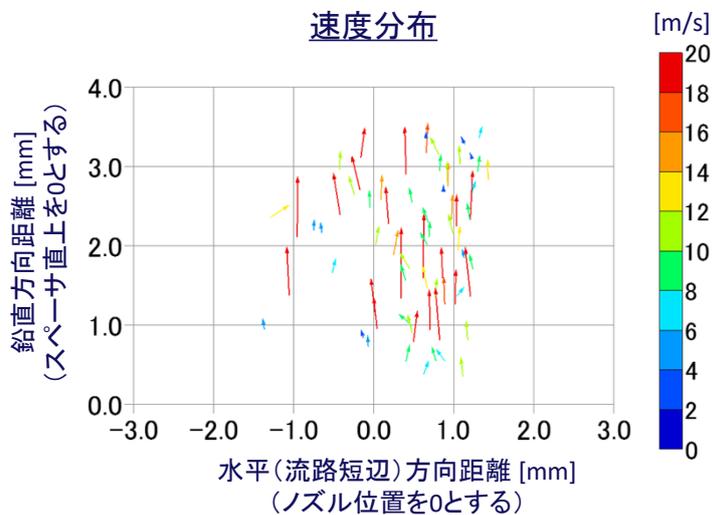


図 3-14 [2/18] 実験結果 (液滴計測 : ケース番号 PM-02)

ノズル位置	鉛直方向位置	空気流速	計測液滴数 水平(流路短辺)方向	計測液滴数 水平(流路長辺)方向
センター	0mm	10m/s	105	106

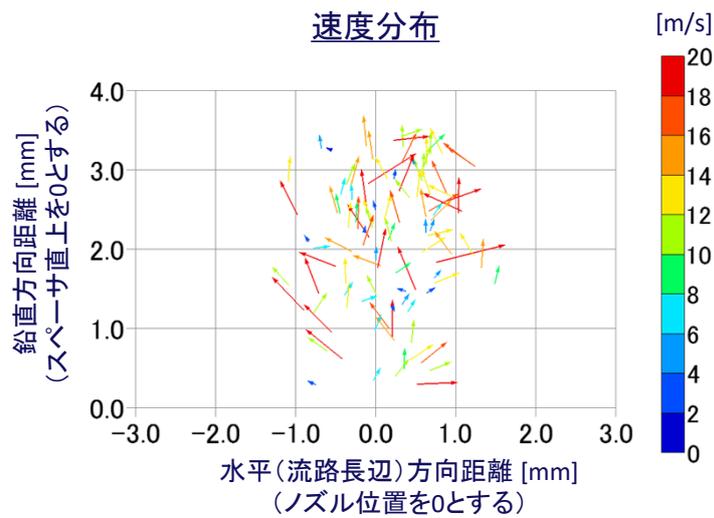
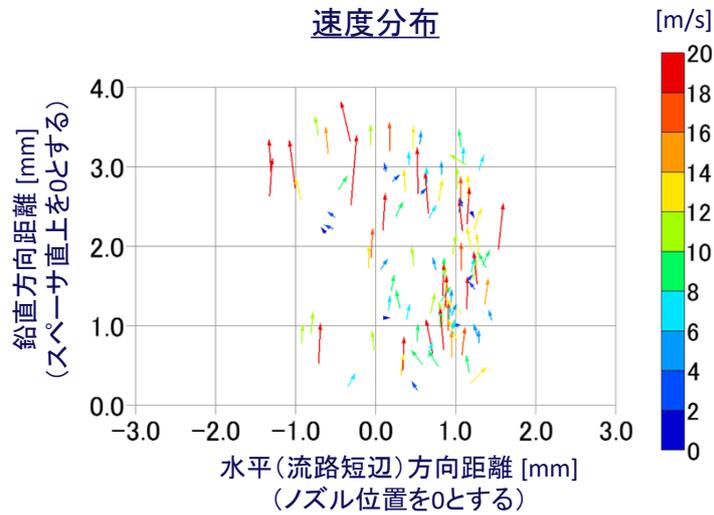


図 3-14 [3/18] 実験結果 (液滴計測 : ケース番号 PM-03)

ノズル位置	鉛直方向位置	空気流速	液滴数
センター	40mm	4m/s	62

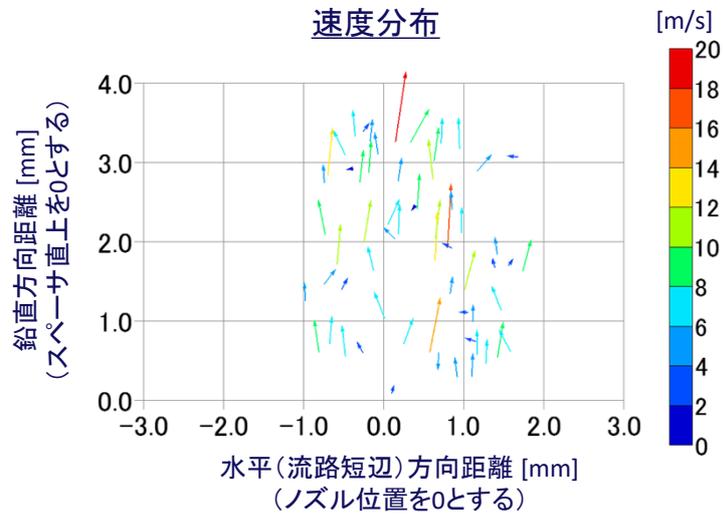


図 3-14 [4/18] 実験結果 (液滴計測 : ケース番号 PM-04)

ノズル位置	鉛直方向位置	空気流速	液滴数
センター	40mm	7m/s	79

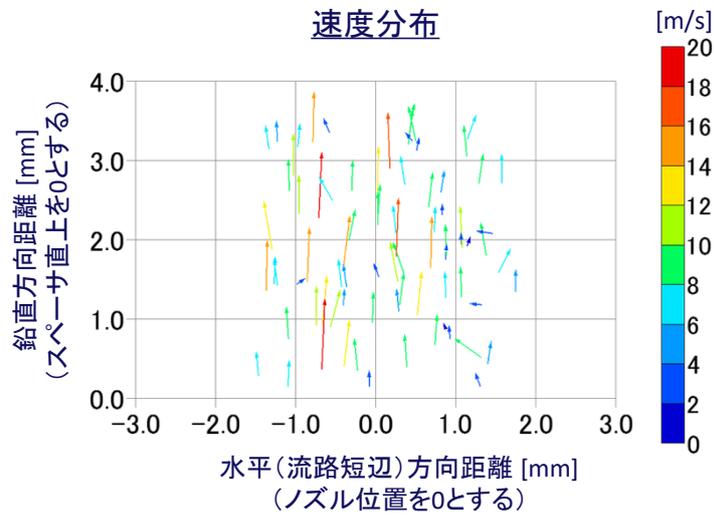


図 3-14 [5/18] 実験結果 (液滴計測 : ケース番号 PM-05)

ノズル位置	鉛直方向位置	空気流速	液滴数
センター	40mm	10m/s	122

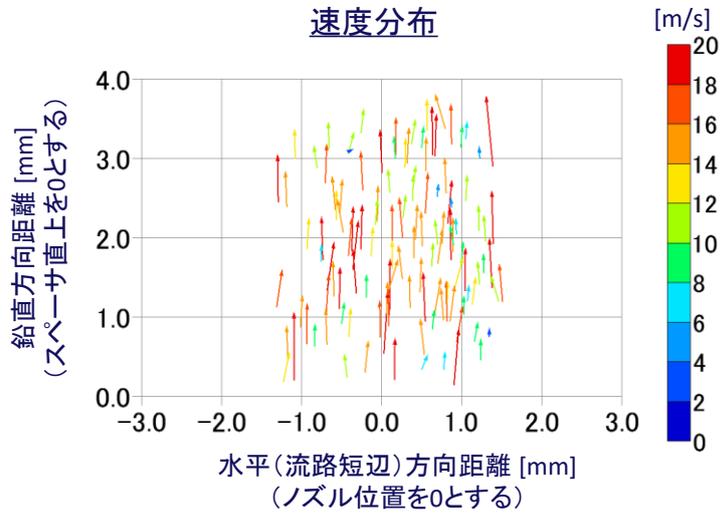


図 3-14 [6/18] 実験結果 (液滴計測 : ケース番号 PM-06)

ノズル位置	鉛直方向位置	空気流速	液滴数
センター	80mm	4m/s	39

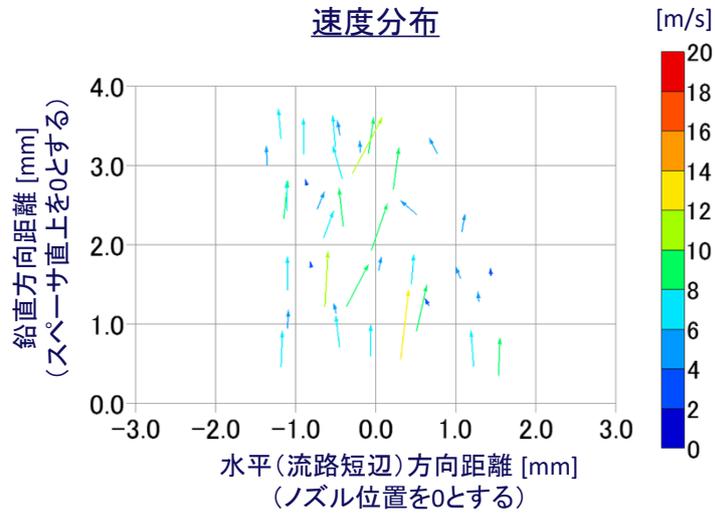


図 3-14 [7/18] 実験結果 (液滴計測 : ケース番号 PM-07)

ノズル位置	鉛直方向位置	空気流速	液滴数
センター	80mm	7m/s	68

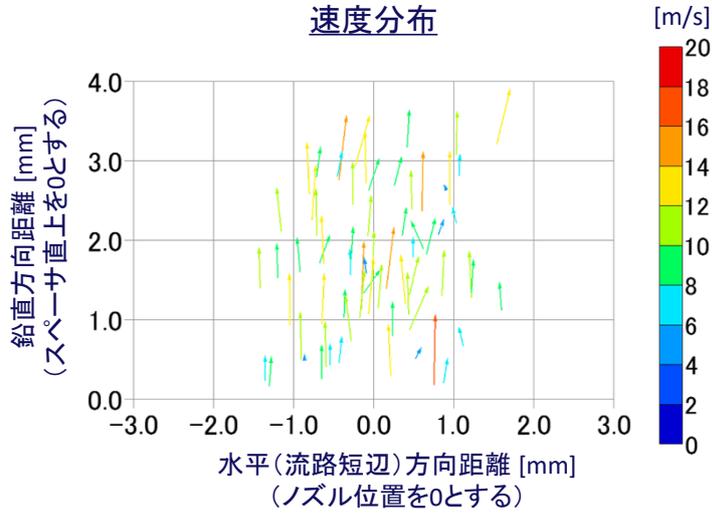


図 3-14 [8/18] 実験結果 (液滴計測 : ケース番号 PM-08)

ノズル位置	鉛直方向位置	空気流速	液滴数
センター	80mm	10m/s	60

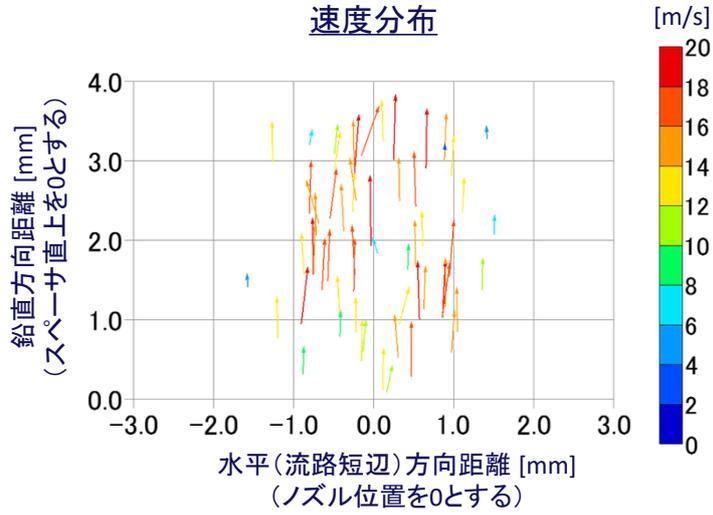


図 3-14 [9/18] 実験結果 (液滴計測 : ケース番号 PM-09)

ノズル位置	鉛直方向位置	空気流速	計測液滴数 水平(流路短辺)方向	計測液滴数 水平(流路長辺)方向
サイド	0mm	4m/s	121	123

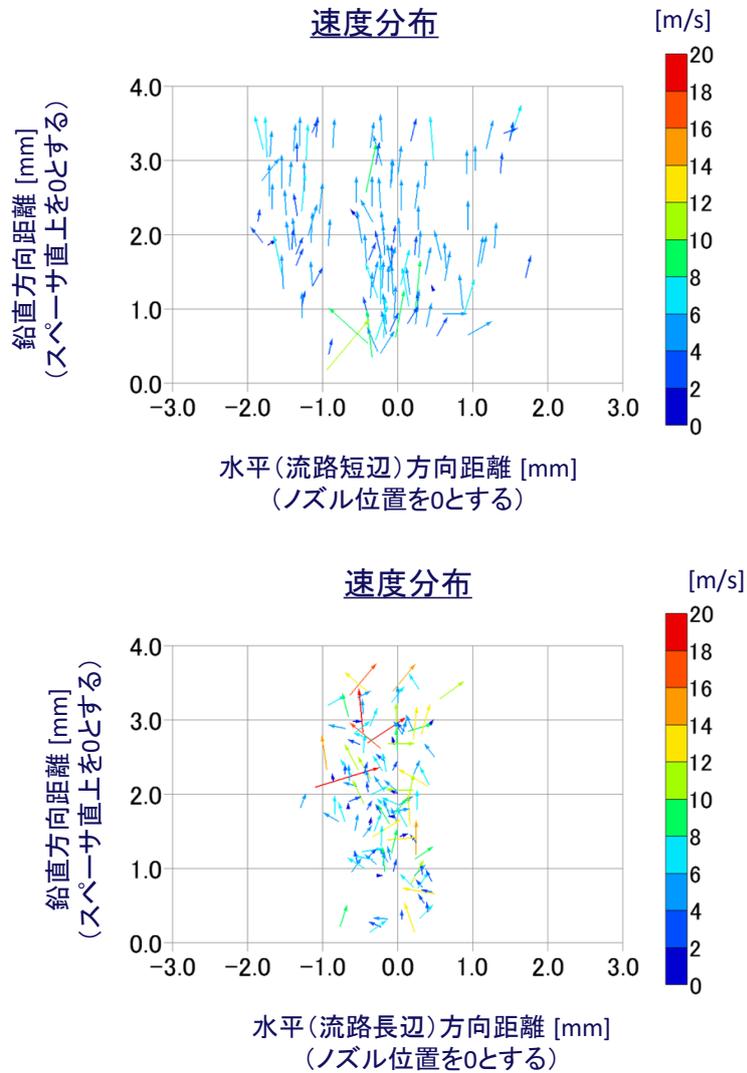


図 3-14 [10/18] 実験結果 (液滴計測 : ケース番号 PM-10)

ノズル位置	鉛直方向位置	空気流速	計測液滴数 水平(流路短辺)方向	計測液滴数 水平(流路長辺)方向
サイド	0mm	7m/s	224	156

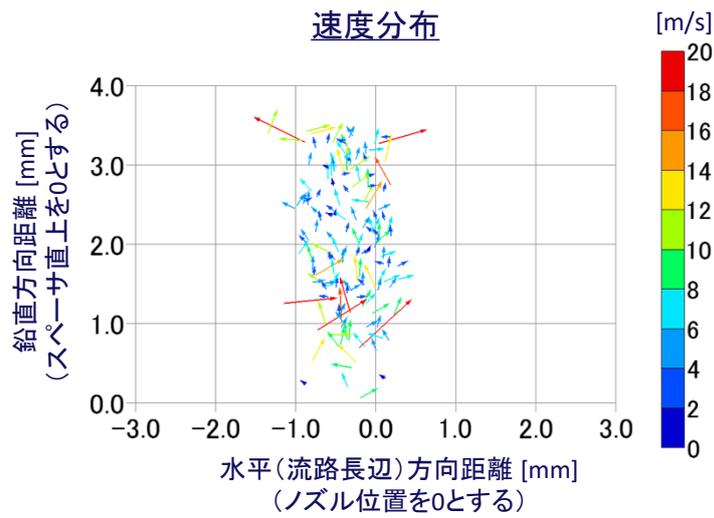
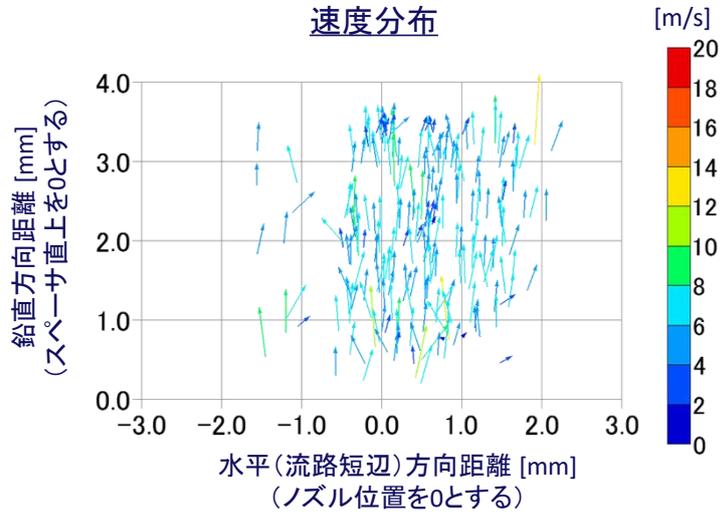


図 3-14 [11/18] 実験結果 (液滴計測: ケース番号 PM-11)

ノズル位置	鉛直方向位置	空気流速	計測液滴数 水平(流路短辺)方向	計測液滴数 水平(流路長辺)方向
サイド	0mm	10m/s	195	219

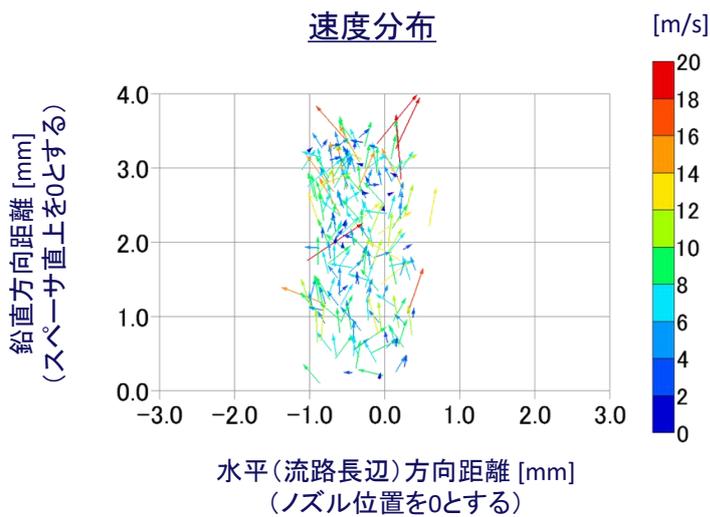
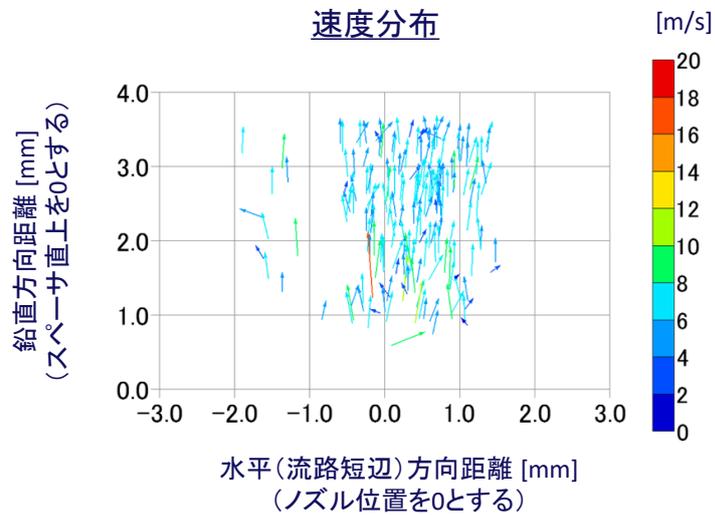


図 3-14 [12/18] 実験結果 (液滴計測：ケース番号 PM-12)

ノズル位置	鉛直方向位置	空気流速	液滴数
サイド	40mm	4m/s	165

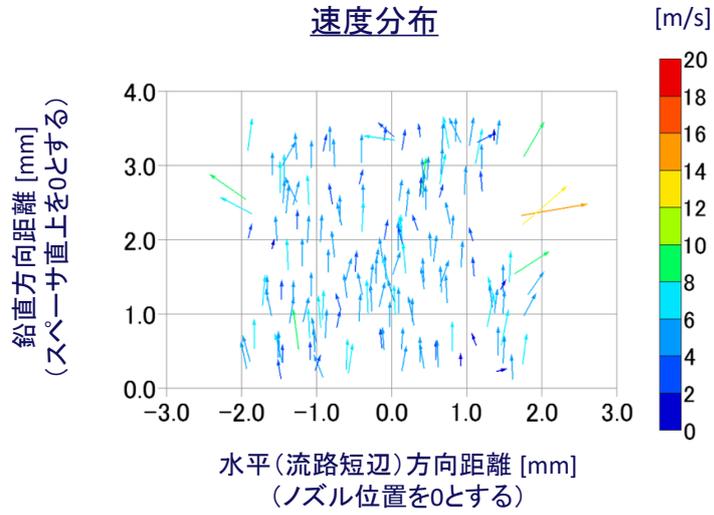


図 3-14 [13/18] 実験結果 (液滴計測 : ケース番号 PM-13)

ノズル位置	鉛直方向位置	空気流速	液滴数
サイド	40mm	7m/s	121

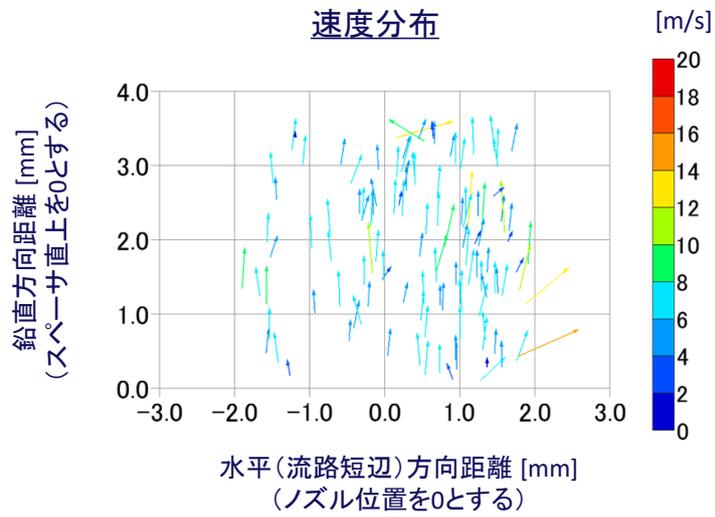


図 3-14 [14/18] 実験結果 (液滴計測 : ケース番号 PM-14)

ノズル位置	鉛直方向位置	空気流速	液滴数
サイド	40mm	10m/s	158

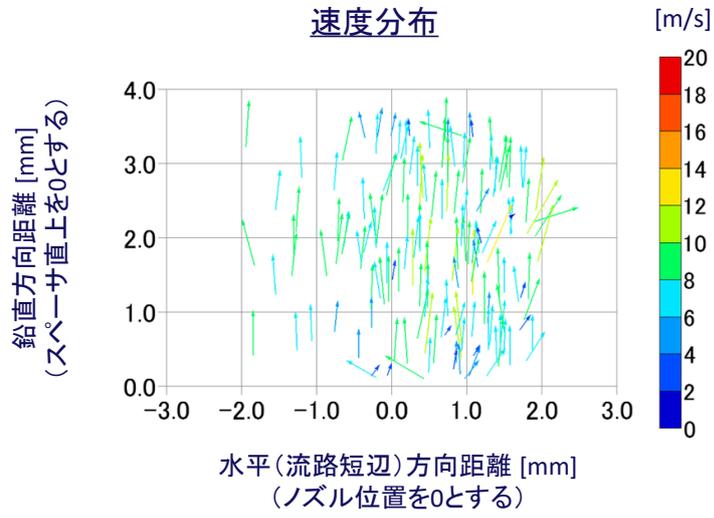


図 3-14 [15/18] 実験結果 (液滴計測 : ケース番号 PM-15)

ノズル位置	鉛直方向位置	空気流速	液滴数
サイド	80mm	4m/s	33

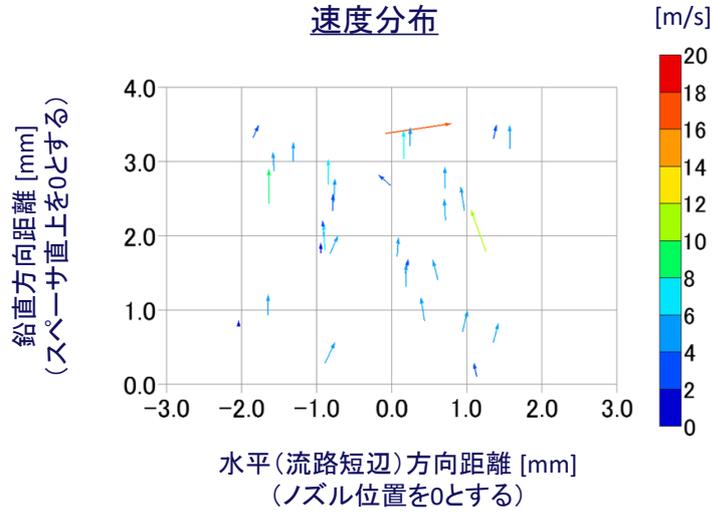


図 3-14 [16/18] 実験結果 (液滴計測 : ケース番号 PM-16)

ノズル位置	鉛直方向位置	空気流速	液滴数
サイド	80mm	7m/s	43

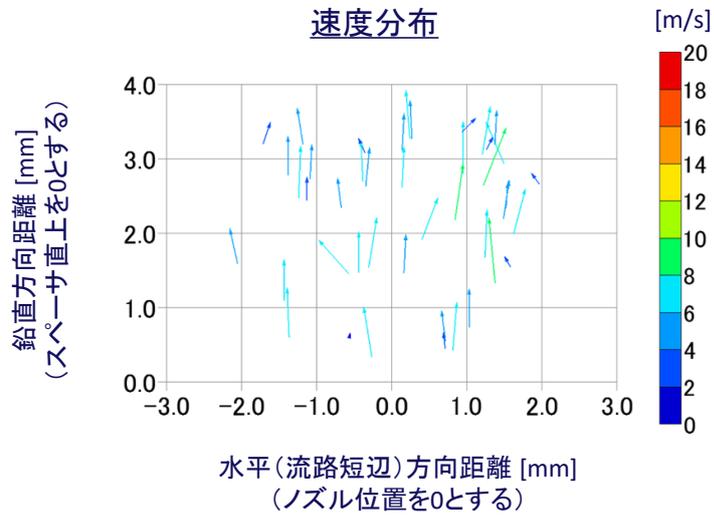


図 3-14 [17/18] 実験結果 (液滴計測：ケース番号 PM-17)

ノズル位置	鉛直方向位置	空気流速	液滴数
サイド	80mm	10m/s	22

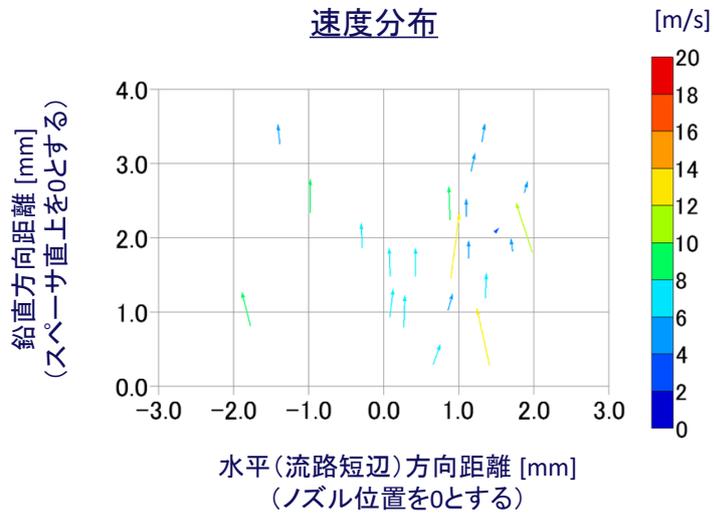
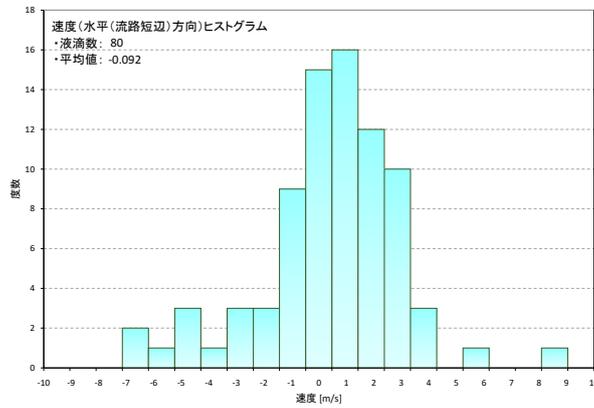


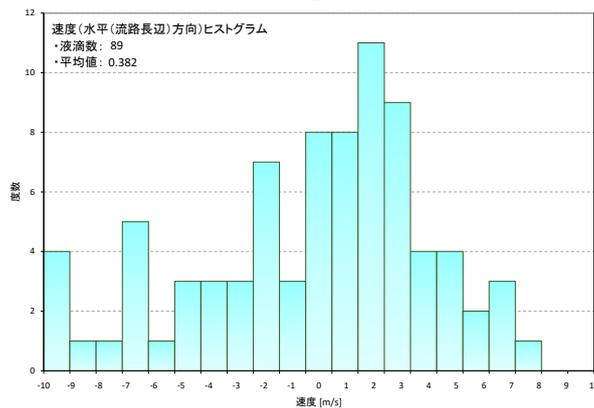
図 3-14 [18/18] 実験結果 (液滴計測 : ケース番号 PM-18)

ノズル位置	鉛直方向位置	空気流速	計測液滴数 水平(流路短辺)方向	計測液滴数 水平(流路長辺)方向
センター	0mm	4m/s	80	89

速度ヒストグラム (水平(流路短辺)方向成分)



速度ヒストグラム (水平(流路長辺)方向成分)



速度ヒストグラム (鉛直方向成分)

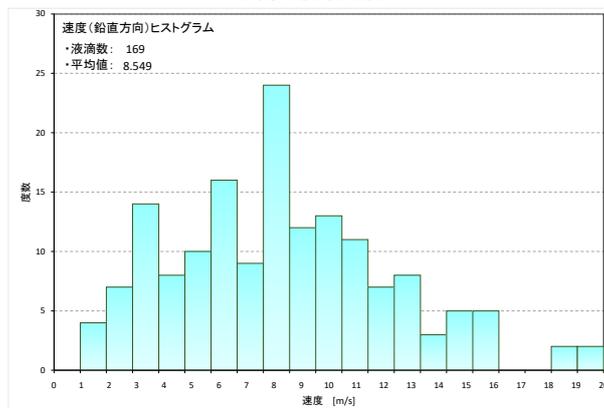
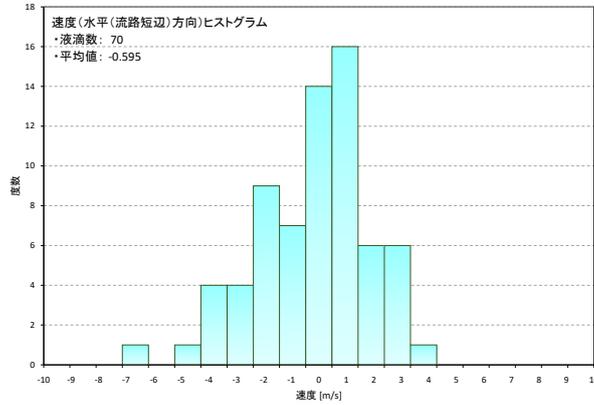


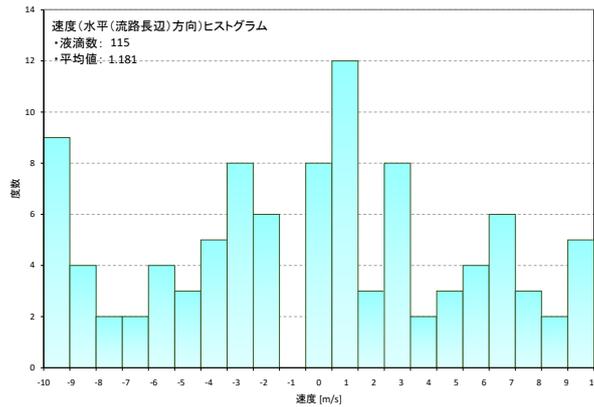
図 3-15 [1/18] 実験結果 (液滴計測: ケース番号 PM-01)

ノズル位置	鉛直方向位置	空気流速	計測液滴数 水平(流路短辺)方向	計測液滴数 水平(流路長辺)方向
センター	0mm	7m/s	70	115

速度ヒストグラム (水平(流路短辺)方向成分)



速度ヒストグラム (水平(流路長辺)方向成分)



速度ヒストグラム (鉛直方向成分)

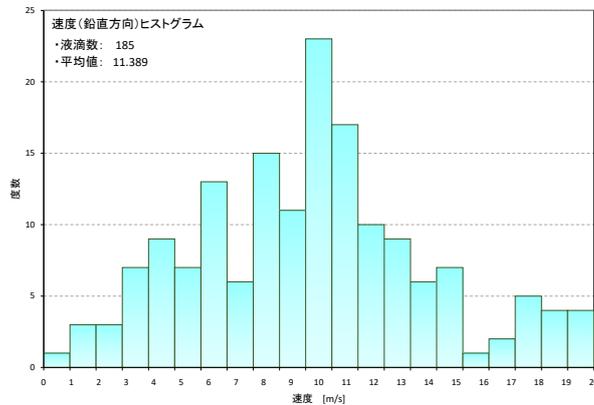
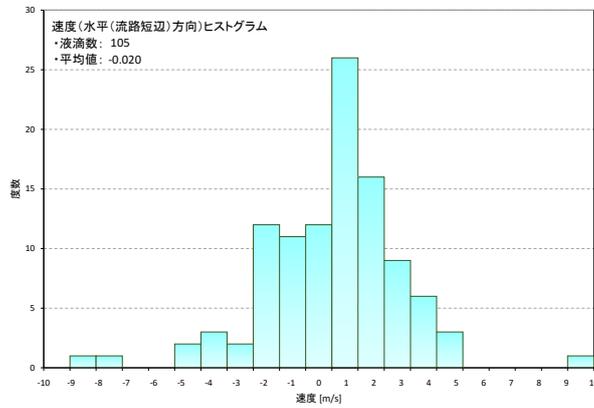


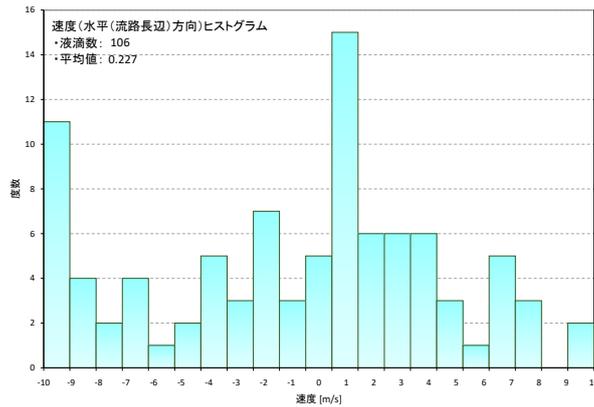
図 3-15 [2/18] 実験結果 (液滴計測: ケース番号 PM-02)

ノズル位置	鉛直方向位置	空気流速	計測液滴数 水平(流路短辺)方向	計測液滴数 水平(流路長辺)方向
センター	0mm	10m/s	105	106

速度ヒストグラム (水平(流路短辺)方向成分)



速度ヒストグラム (水平(流路長辺)方向成分)



速度ヒストグラム (鉛直方向成分)

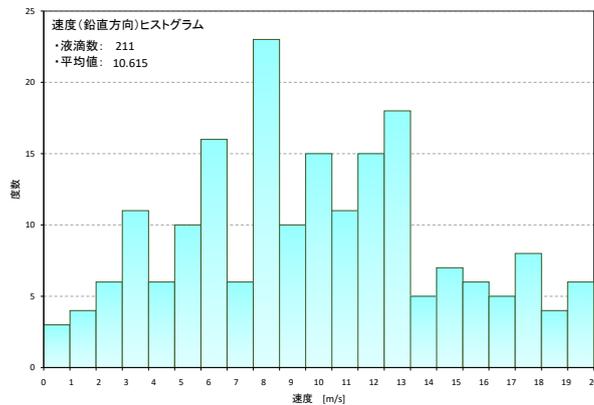
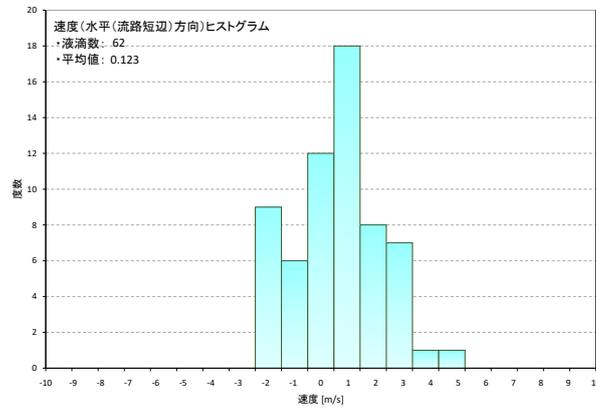


図 3-15 [3/18] 実験結果 (液滴計測: ケース番号 PM-03)

ノズル位置	鉛直方向位置	空気流速	液滴数
センター	40mm	4m/s	62

速度ヒストグラム (水平(流路短辺)方向成分)



速度ヒストグラム (鉛直方向成分)

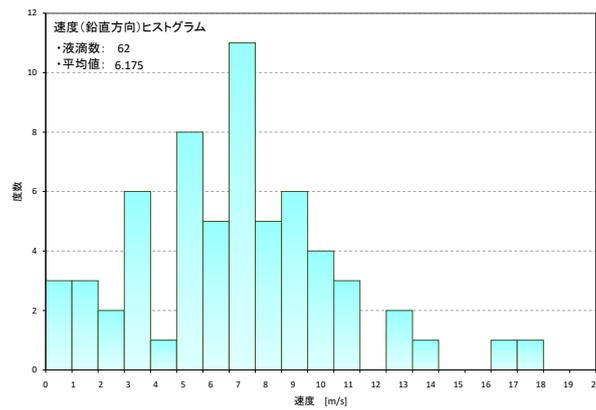
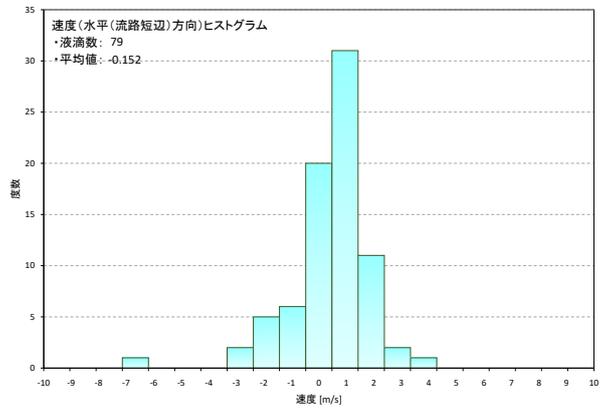


図 3-15 [4/18] 実験結果 (液滴計測: ケース番号 PM-04)

ノズル位置	鉛直方向位置	空気流速	液滴数
センター	40mm	7m/s	79

速度ヒストグラム (水平(流路短辺)方向成分)



速度ヒストグラム (鉛直方向成分)

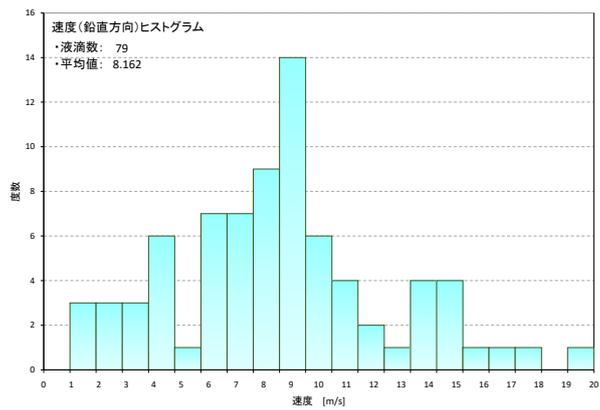
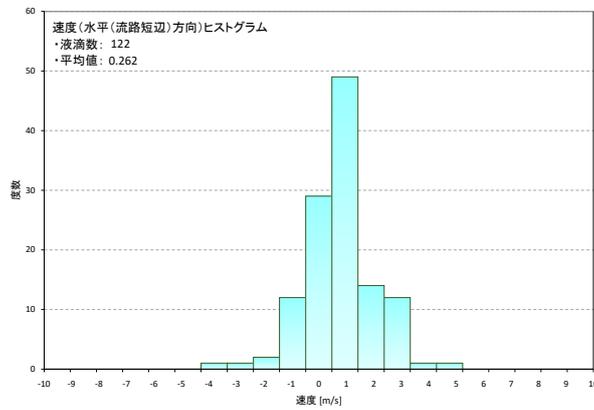


図 3-15 [5/18] 実験結果 (液滴計測: ケース番号 PM-05)

ノズル位置	鉛直方向位置	空気流速	液滴数
センター	40mm	10m/s	122

速度ヒストグラム (水平(流路短辺)方向成分)



速度ヒストグラム (鉛直方向成分)

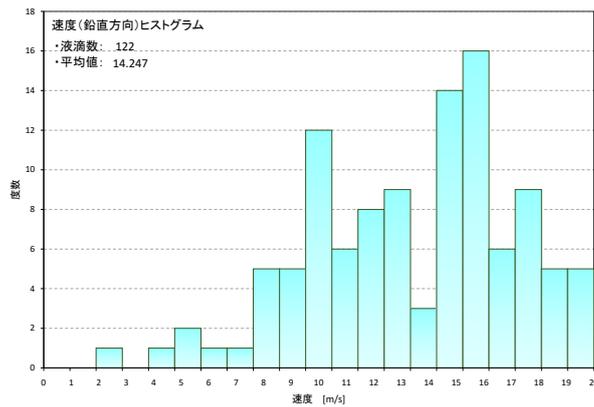
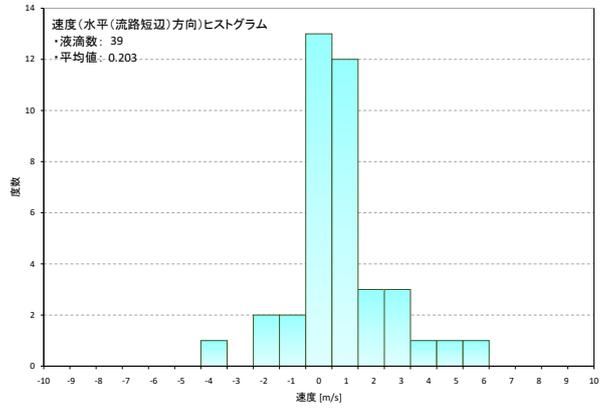


図 3-15 [6/18] 実験結果 (液滴計測: ケース番号 PM-06)

ノズル位置	鉛直方向位置	空気流速	液滴数
センター	80mm	4m/s	39

速度ヒストグラム (水平(流路短辺)方向成分)



速度ヒストグラム (鉛直方向成分)

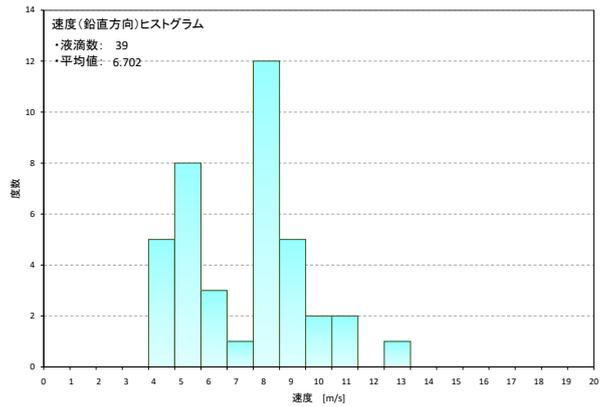
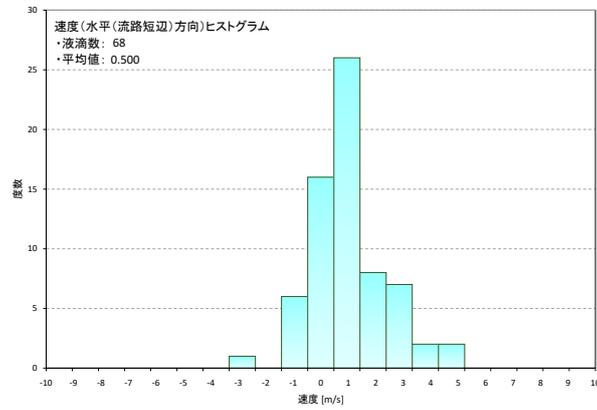


図 3-15 [7/18] 実験結果 (液滴計測: ケース番号 PM-07)

ノズル位置	鉛直方向位置	空気流速	液滴数
センター	80mm	7m/s	68

速度ヒストグラム (水平(流路短辺)方向成分)



速度ヒストグラム (鉛直方向成分)

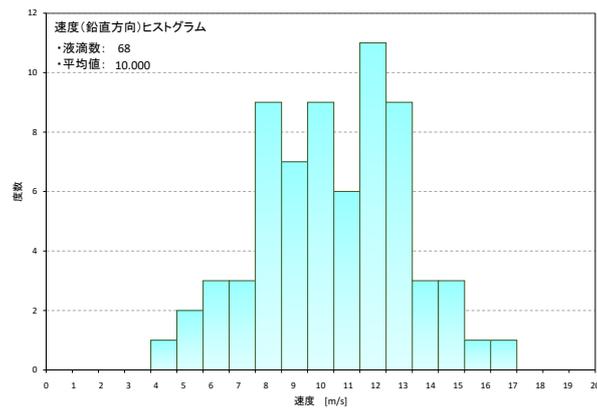
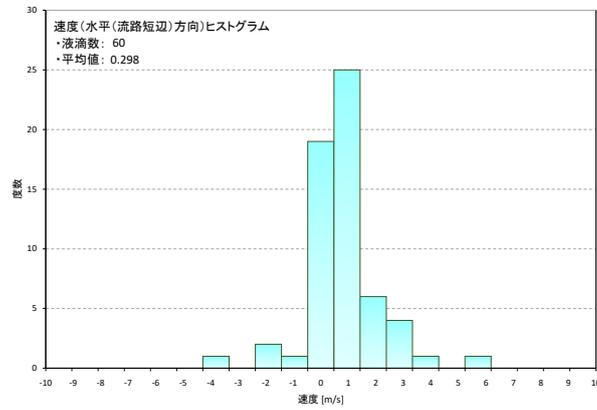


図 3-15 [8/18] 実験結果 (液滴計測: ケース番号 PM-08)

ノズル位置	鉛直方向位置	空気流速	液滴数
センター	80mm	10m/s	60

速度ヒストグラム (水平(流路短辺)方向成分)



速度ヒストグラム (鉛直方向成分)

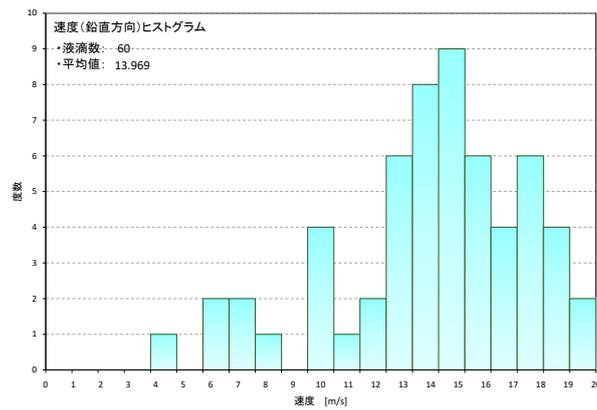
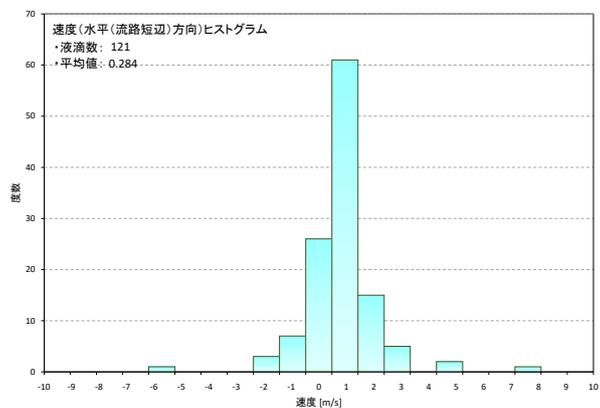


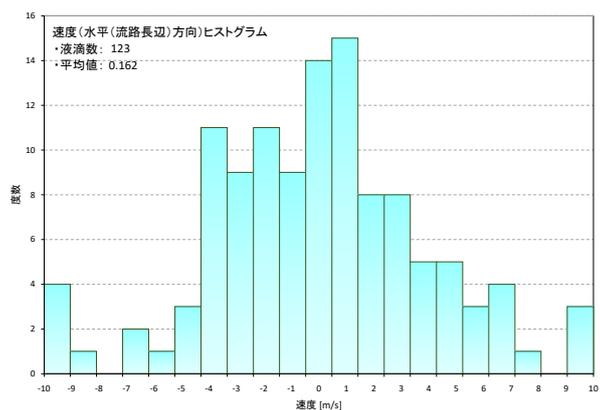
図 3-15 [9/18] 実験結果 (液滴計測: ケース番号 PM-09)

ノズル位置	鉛直方向位置	空気流速	計測液滴数 水平(流路短辺)方向	計測液滴数 水平(流路長辺)方向
サイド	0mm	4m/s	121	123

速度ヒストグラム (水平(流路短辺)方向成分)



速度ヒストグラム (水平(流路長辺)方向成分)



速度ヒストグラム (鉛直方向成分)

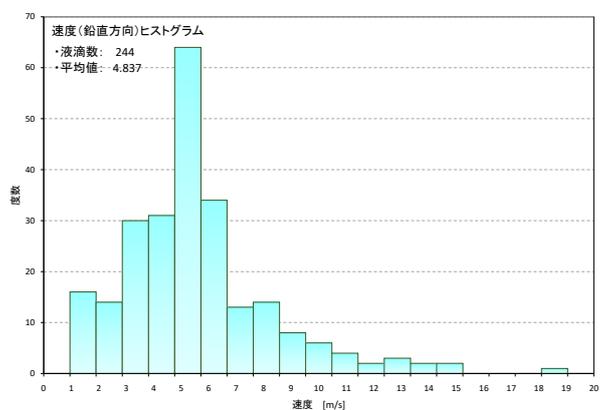
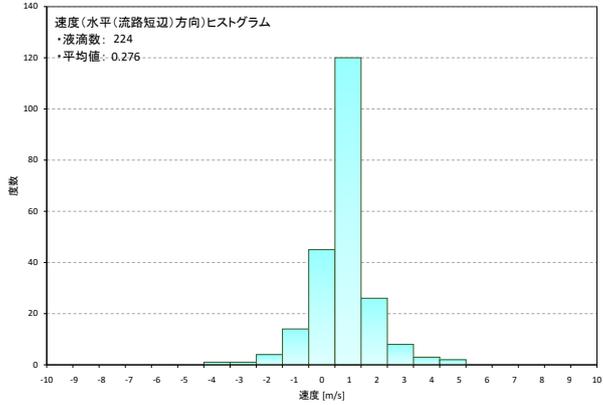


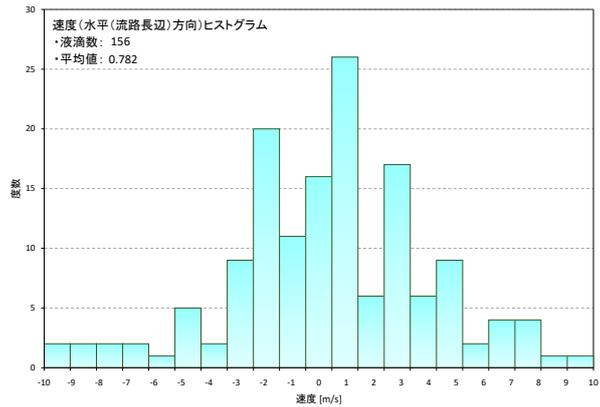
図 3-15 [10/18] 実験結果 (液滴計測: ケース番号 PM-10)

ノズル位置	鉛直方向位置	空気流速	計測液滴数 水平(流路短辺)方向	計測液滴数 水平(流路長辺)方向
サイド	0mm	7m/s	224	156

速度ヒストグラム (水平(流路短辺)方向成分)



速度ヒストグラム (水平(流路長辺)方向成分)



速度ヒストグラム (鉛直方向成分)

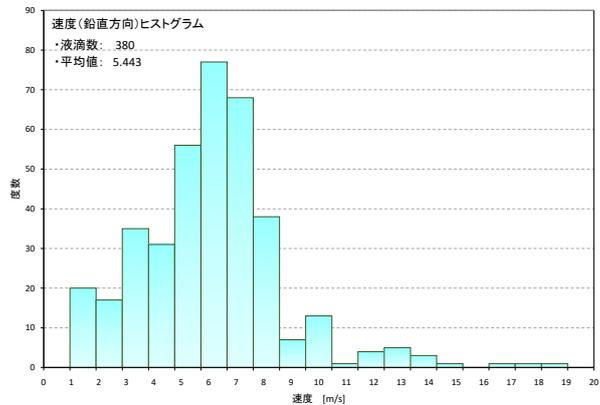
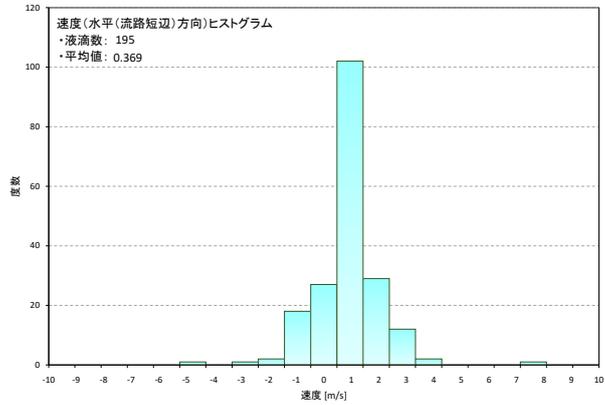


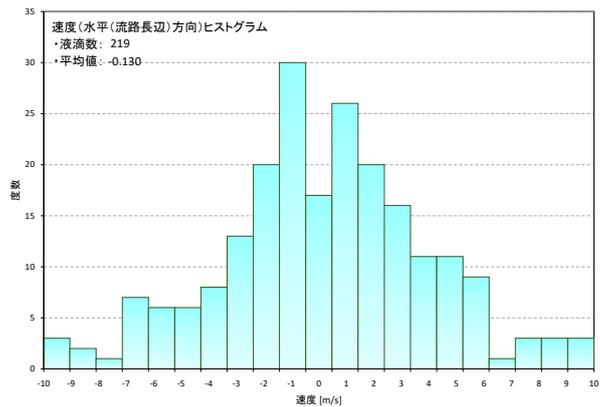
図 3-15 [11/18] 実験結果 (液滴計測: ケース番号 PM-11)

ノズル位置	鉛直方向位置	空気流速	計測液滴数 水平(流路短辺)方向	計測液滴数 水平(流路長辺)方向
サイド	0mm	10m/s	195	219

速度ヒストグラム (水平(流路短辺)方向成分)



速度ヒストグラム (水平(流路長辺)方向成分)



速度ヒストグラム (鉛直方向成分)

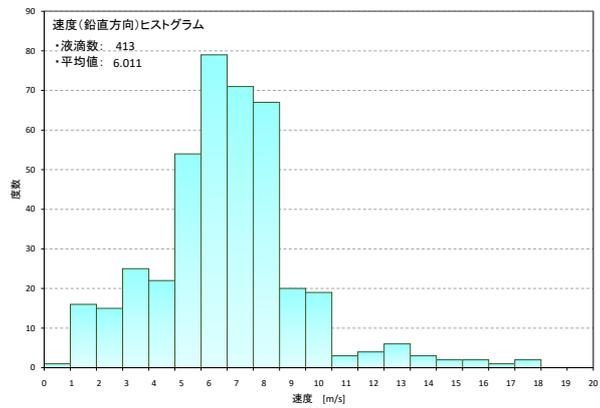
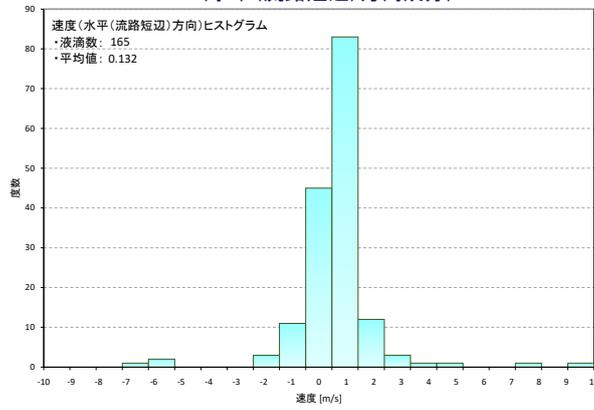


図 3-15 [12/18] 実験結果 (液滴計測: ケース番号 PM-12)

ノズル位置	鉛直方向位置	空気流速	液滴数
サイド	40mm	4m/s	165

速度ヒストグラム (水平(流路短辺)方向成分)



速度ヒストグラム (鉛直方向成分)

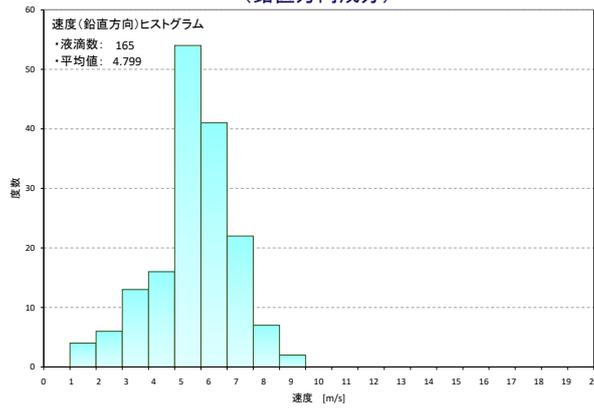
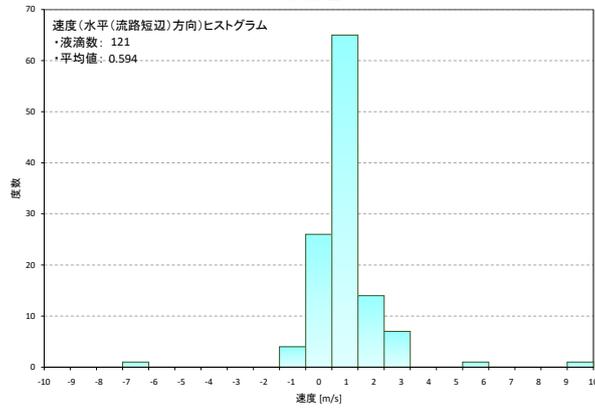


図 3-15 [13/18] 実験結果 (液滴計測: ケース番号 PM-13)

ノズル位置	鉛直方向位置	空気流速	液滴数
サイド	40mm	7m/s	121

速度ヒストグラム (水平(流路短辺)方向成分)



速度ヒストグラム (鉛直方向成分)

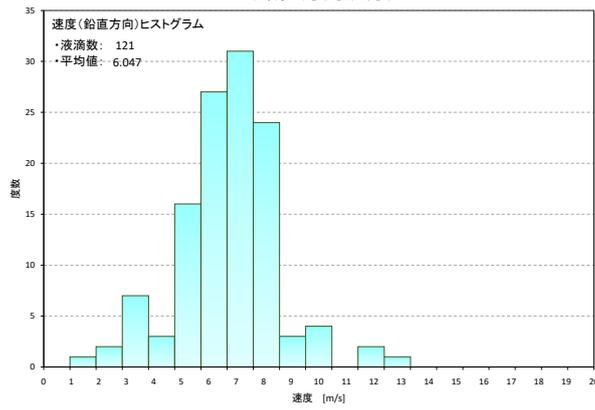
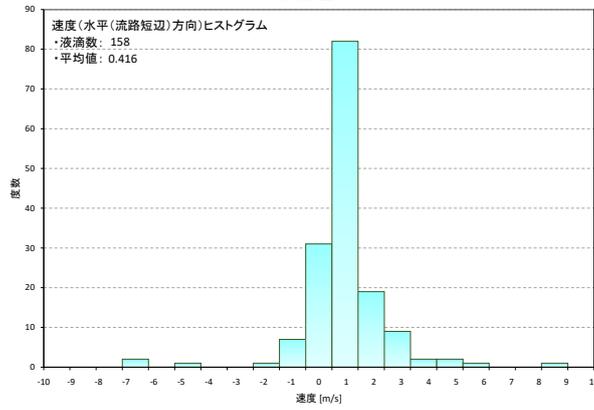


図 3-15 [14/18] 実験結果 (液滴計測: ケース番号 PM-14)

ノズル位置	鉛直方向位置	空気流速	液滴数
サイド	40mm	10m/s	158

速度ヒストグラム (水平(流路短辺)方向成分)



速度ヒストグラム (鉛直方向成分)

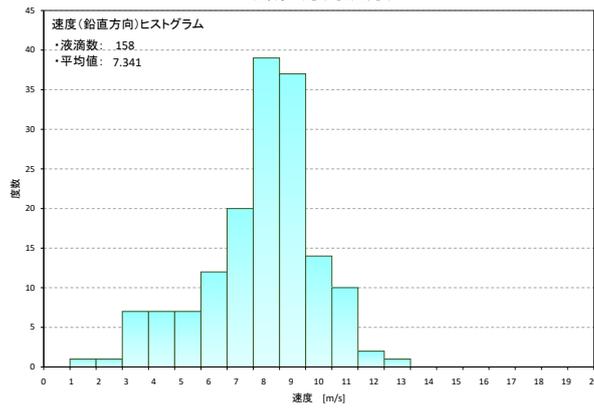
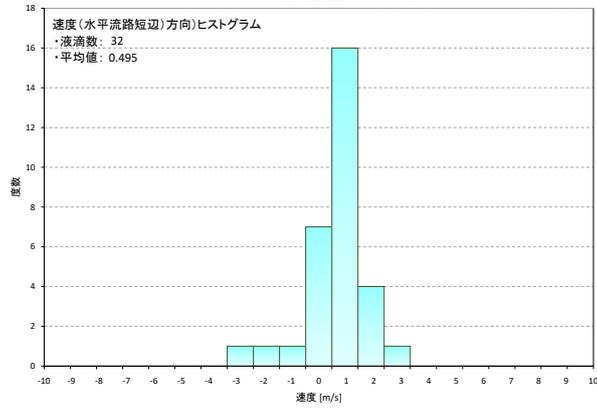


図 3-15 [15/18] 実験結果 (液滴計測: ケース番号 PM-15)

ノズル位置	鉛直方向位置	空気流速	液滴数
サイド	80mm	4m/s	33

速度ヒストグラム (水平(流路短辺)方向成分)



速度ヒストグラム (鉛直方向成分)

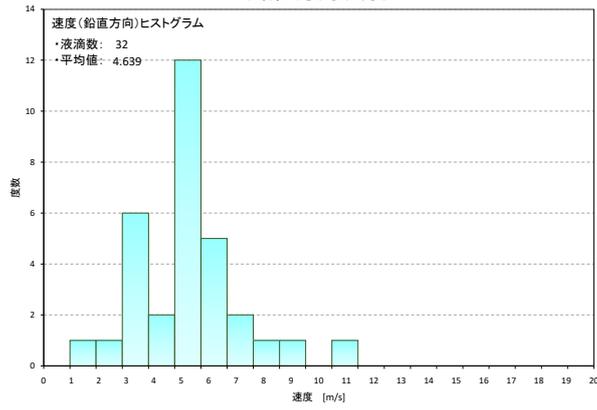
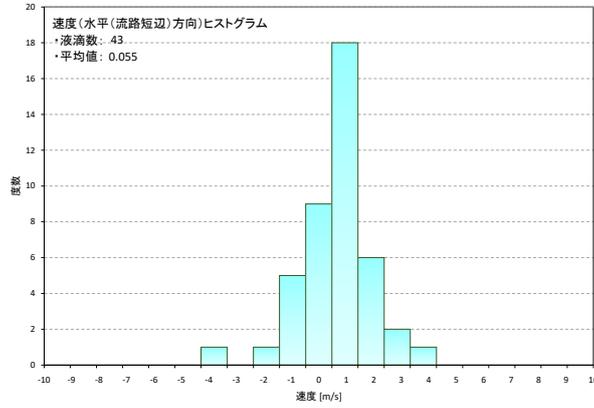


図 3-15 [16/18] 実験結果 (液滴計測: ケース番号 PM-16)

ノズル位置	鉛直方向位置	空気流速	液滴数
サイド	80mm	7m/s	43

速度ヒストグラム (水平(流路短辺)方向成分)



速度ヒストグラム (鉛直方向成分)

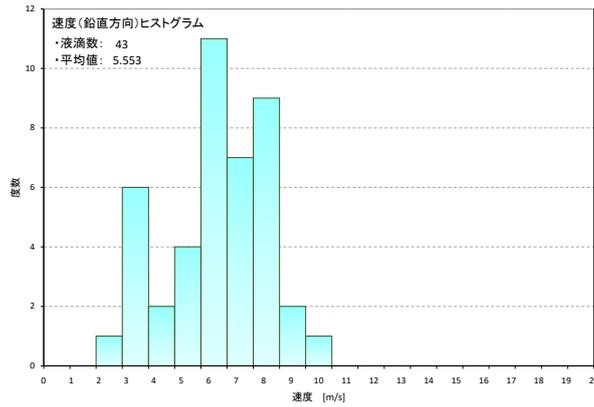
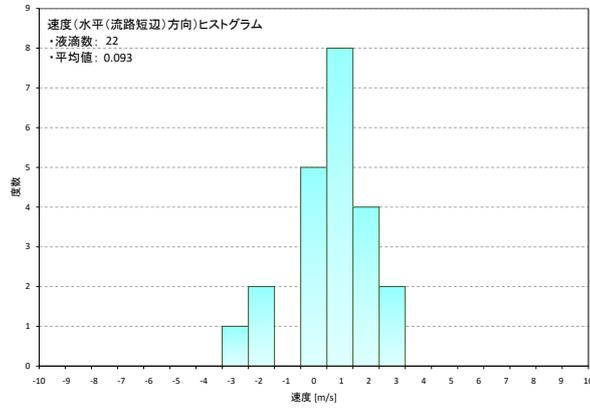


図 3-15 [17/18] 実験結果 (液滴計測: ケース番号 PM-17)

ノズル位置	鉛直方向位置	空気流速	液滴数
サイド	80mm	10m/s	22

速度ヒストグラム (水平(流路短辺)方向成分)



速度ヒストグラム (鉛直方向成分)

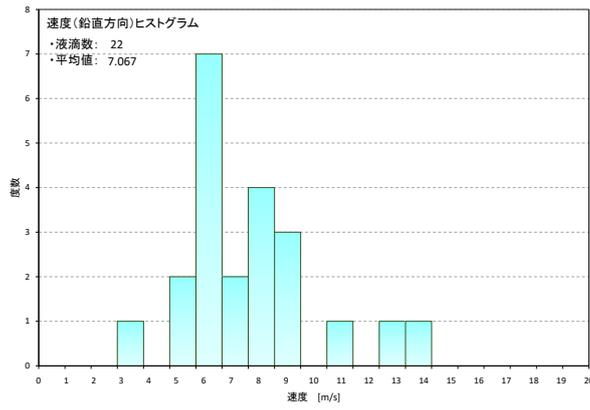


図 3-15 [18/18] 実験結果 (液滴計測: ケース番号 PM-18)

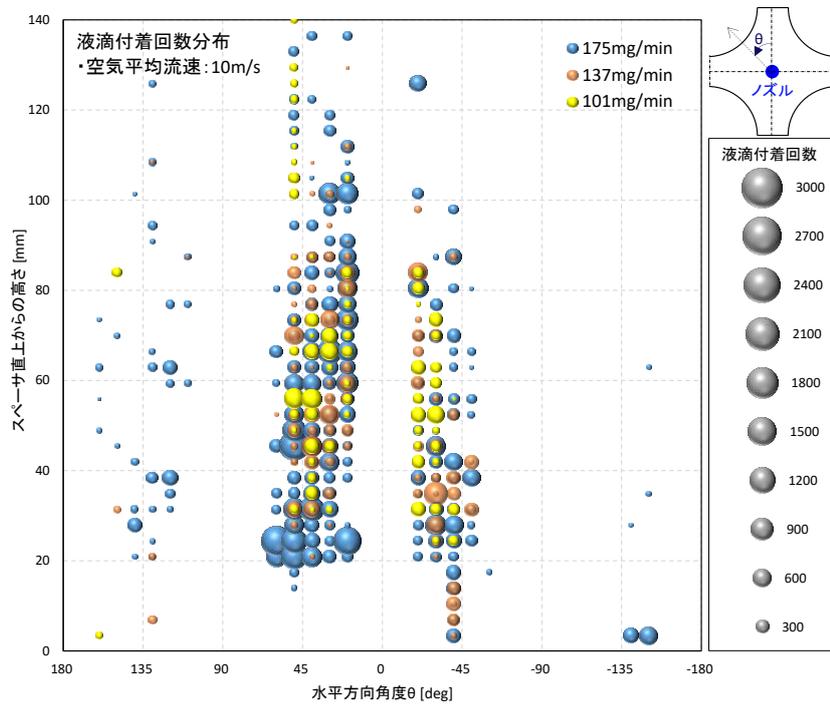


図 3-16 分析・考察（液滴放出量の影響）

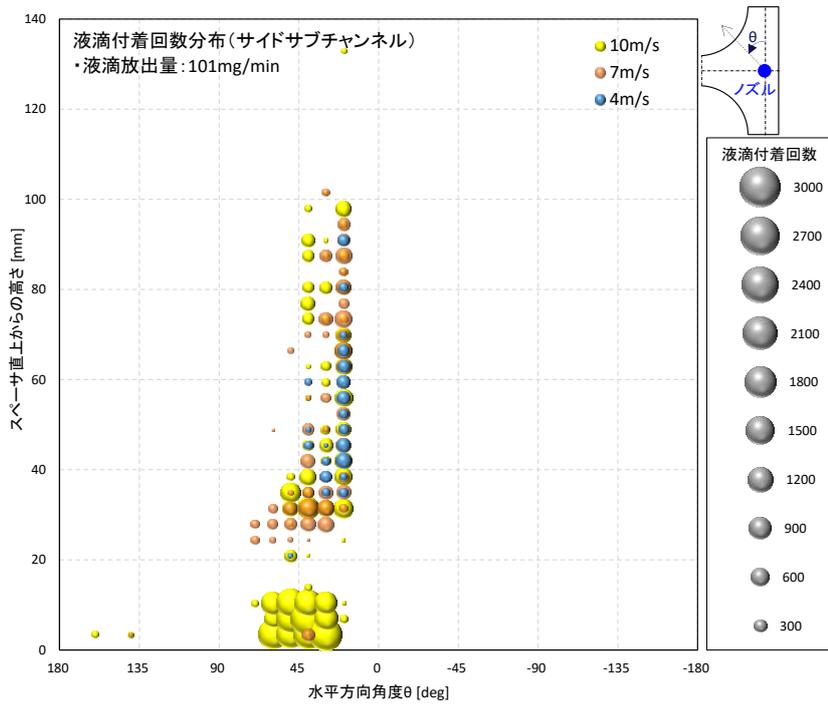
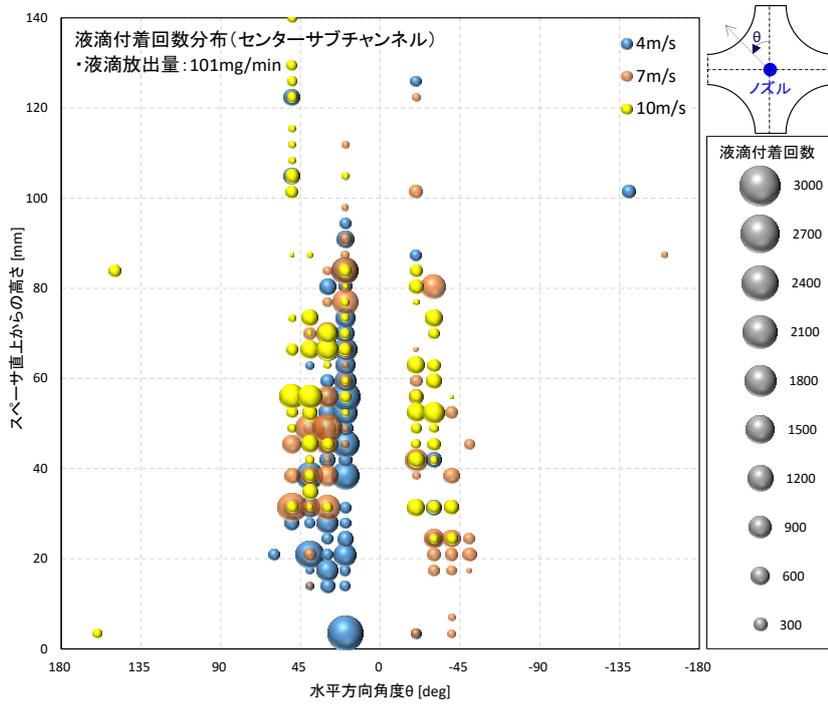


図 3-17 分析・考察 (サブチャンネルと空気平均流速の影響)

4. 結言

BWR 燃料集合体の除熱性能に資するスパーサによる液滴付着効果のメカニズムの解明とモデル化を目指し、原子力規制庁にて平成 28 年度より開始された「原子力施設等防災対策等委託費（スパーサ影響評価試験）事業」において、1 年目の昨年度に設計・製作された BWR 燃料集合体内の代表的なサブチャンネルを模擬した流路構成のテスト部を有する試験装置を用い、2 年目にあたる本年度は以下に示す業務を実施した。

- 下記の各計測対象項目について、計測方法・手順および取得データの処理・加工に至る計測体系を確立し、実験装置の最適化を行った。
 - テスト部流路を流れる空気流については、PIV の画像相関法により、噴霧状態の水滴をトレーサー粒子として計測を行った。流路形状が複雑なため撮影可能な範囲が限定されカメラで捉えられるトレーサー粒子数が少なくなる計測条件の中でも、PIV における探査窓の調整と計測の長時間化およびその平均化処理を通じて、テスト部流路を流れる空気の流動場を可視化・定量化するプロセスを構築した。
 - スパーサを通過した液滴が模擬燃料棒表面に付着して形成される液膜については、液膜の付着に伴う電気的变化（コンダクタンスの変化）を検知する液膜センサを表面上に多点装着したテスト部を製作し、計測を行った。センサ感度を上げるため電解質を微量溶解させて励起電位を上げ、既知の液膜厚さに対する電位を求めるキャリブレーションを前もって実施し、電位から液膜厚さへの変換とその結果の可視化に至る一連のデータ処理を半自動的に行えるよう整備した。
 - 空気流に随伴して流れる液滴については、まずノズル先端の加工処理やプランジャーポンプの導入により安定的な形状の液滴を生成・射出する機構を整え、粒子追跡法により液滴挙動を直接撮影して計測を行った。大容量の撮影画像のデータ処理を要するため、計測後に液滴の画像認識を高精度・高速に行える画像処理機能を整備し、大幅な時間効率化を実現した。
- 以上の整備により計測作業の大幅な効率化が実現され、取得データを横断的に分析して以下に示す知見が得られた。
 - ノズルから放出される個々の液滴の直径を光学計測し頻度分布を得た。得られた液滴径の最頻値は 0.36mm であり、液滴放出頻度や周囲空気流速などに影響されず概ね一定値であることを確認した。この値は BWR で発生すると考えられる液滴径範囲内であり、本試験が良好な模擬性を有していることを確認した。
 - 液滴付着位置及び付着量（液膜厚さ分布）については、液滴放出頻度を高めるに従って模擬燃料棒表面への衝突頻度は高くなり、燃料棒濡れ面積も拡大する傾向が見られた。
 - 個々の液滴に対して速度ベクトルを計測したところ、液膜厚さとして検出された液滴衝突位置に向かう速度ベクトルが検出された。液滴衝突位置に加え速度ベクトルを取得することで、種々のスパーサに対す

る液膜流量増大効果を説明する上で重要な判断因子となるデータの取得を可能とした。

- ▶ サブチャンネル流路が狭い方向では側壁効果により水平方向速度が小さくなる一方、隣接サブチャンネルと繋がる場合には変動が大きく、側壁の効果や隣接サブチャンネルに与える液滴移流効果などの把握に重要な分析材料が得られた。

参考文献

- 1) 社団法人日本原子力学会、「BWR における過渡的な沸騰遷移後の燃料健全性評価基準：2003」、平成 15 年 6 月
- 2) 東京工業大学など、「広範囲の燃料格子仕様に適用する汎用沸騰遷移解析手法に関する技術開発」、平成 14 年度～16 年度
- 3) 一般財団法人電力中央研究所、「平成 28 年度原子力施設等防災対策等委託費（スペーサ影響評価試験）事業 成果報告書」、平成 29 年 3 月
- 4) LaVision GmbH, “Product-Manual DaVis 8.4 Software”
- 5) LaVision GmbH, “Product-Manual FlowMaster”
- 6) LaVision GmbH, “ParticleMaster Shadow Quick Start Manual”
- 7) Teletronic Rossendorf GmbH, “WMS200 Manual”,
<http://mpmt.de/en/products/wire-mesh-sensor/en/downloads/manual-wire-mesh-sensor-system-wms200>
- 8) The MathWorks, Inc., <https://jp.mathworks.com/products/matlab.html>