

平成 30 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 31 年 3 月

本報告書は、原子力規制委員会原子力規制庁からの委託により実施した業務の成果をとりまとめたものです。

本報告書に関する問い合わせは、原子力規制庁までお願いします。

目次

1. 緒言（背景と目的）	1
2. 実験装置	2
2.1. 実験装置の構成機器	2
2.1.1. 実験体系全体	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	3
2.1.5. 模擬スプレーサ	3
2.2. 計測系	3
2.2.1. 空気流（気相流速分布）	4
2.2.2. スプレーサ通過後の液滴運動	4
2.2.3. スプレーサ通過後の燃料棒表面への液滴付着	4
2.3. 作動流体	5
3. 実験の実施	23
3.1. 実験条件及び方法	23
3.1.1. 空気流（気相流速分布）	23
3.1.2. スプレーサ通過後の液滴運動	23
3.1.3. スプレーサ通過後の燃料棒表面への液滴付着	24
3.2. 実験結果	24
3.2.1. 空気流（気相流速分布）	24
3.2.2. スプレーサ通過後の液滴運動	25
3.2.3. スプレーサ通過後の燃料棒表面への液滴付着	27
3.3. 分析・考察	28
4. 結言	180

表目次

表 2-1	スプレ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	液滴運動の計測システムの基本仕様.....	8
表 2-4	液膜センサの主要構成.....	9
表 3-1	実験パラメータ.....	30
表 3-2	空気流計測に必要な設定項目.....	31
表 3-3	スプレーサ通過後の液滴運動の計測に必要な設定項目.....	32
表 3-4	スプレーサ通過後の燃料棒表面への液滴付着計測に必要な設定項目.....	33
表 3-5	実験環境（系圧力及び温度）の計測結果.....	34
表 3-6	空気流計測：速度並びに乱流エネルギーの時間・空間平均値.....	41
表 3-7	液滴付着計測：クロスフローによる付着割合 [1/3].....	42

図目次

図 2-1	実験装置の全体概要.....	10
図 2-2	テスト部.....	11
図 2-3	可視化流路.....	12
図 2-4	テスト部流路.....	13
図 2-5	空気流供給部.....	14
図 2-6	液滴射出部.....	15
図 2-7	模擬スプレーサ.....	16
図 2-8	空気流計測：各ハード機器の配置.....	17
図 2-9	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.....	18
図 2-10	液滴運動の計測：各ハード機器の配置.....	19
図 2-11	液滴運動の計測：解析ソフトウェアのユーザーインターフェース.....	20
図 2-12	液滴付着の計測：液膜センサの主要構成と寸法.....	21
図 2-13	液滴付着の計測：WMS200 のユーザーインターフェース.....	22
図 3-1	空気流計測方法.....	45
図 3-2	スプレーサ通過後の液滴運動の計測方法.....	46
図 3-3	スプレーサ通過後の燃料棒表面への液滴付着の計測方法.....	47
図 3-4	空気流計測：速度ベクトル及び乱流統計量の空間分布.....	48
図 3-5	液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係.....	68
図 3-6	液滴付着計測：液滴付着頻度と分布.....	124

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、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。丸セル型（各燃料棒をリング状のセルで支持）及びグリッド型（格子状に部材で区切りその間に燃料棒を固定）が代表的な形状であり、これらにフロータブ（スペーサ外周枠に装着される内側に向けた「く」の字形の部材）あるいは旋回羽（グリッド型における格子の交点部分に装着される羽型の部材）等が付随されている型が見られる。

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 パ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 年目の一昨年度は、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 年目の昨年度は、その試験装置を用いて、代表的なスペーサとして丸セル型を取り上げ、テスト部流路を流れる空気流及び液滴、並び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した⁴⁾。

3 年目にあたる今年度は、昨年度浮上した計測上の課題を踏まえてテスト部に改良を施し計測性能を向上させると共に、多種のスペーサに計測対象を拡張し、実験データベースの拡張を図った。具体的には、昨年度の丸セル型にグリッド型を加え、さらに前者に対してはフロータブ装着の有無、後者に対しては旋回羽装着の有無を考慮した。

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、過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、実験装置の構成機器及び計測系の詳細、並びに実験で用いる作動流体について述べる。表 2-1 にスプレー影響評価試験の基本仕様を示す。

2.1. 実験装置の構成機器

本節では、実験装置の体系全体の概要を述べ、実験にあたり重要な構成機器について、過年度から改良を施したものを中心に述べる。

2.1.1. 実験体系全体

実験装置の全体概要を図 2-1 に示す。作動流体の計測を行うテスト部に連結する配管は、入口側は作動流体である空気流の供給系統と液滴の供給系統とで構成されており、出口側は作動流体を気相と液相に分離する容器を経て排気ダクトに連結されている。空気流の供給系統は、上流側で空気タンクにより加圧及び減圧弁により調整され、所定の流量にてテスト部に供給される。液滴の供給系統は、上流側にプランジャーポンプが連結され、その往復運動の時間、距離及び圧力を調整することにより、液滴生成のための水が周期的にノズルに供給される。

2.1.2. テスト部

実験装置の中で、模擬スプレーを含み作動流体の計測を行うテスト部を図 2-2 に示す。後述するように液滴に関する計測対象は、スプレー通過後の液滴運動と、燃料棒表面への液滴付着の 2 項目であり、各々に対してテスト部が装備される。

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。ノズルから射出された液滴が空気流に随伴して上昇する領域を経て、その上に高さ 30mm の模擬スプレーが配置され、そこから上部（下流側）が計測領域となる。

液滴運動は光学計測で計測するため、図 2-3 に示すようなアクリル外壁の可視化流路をスプレー通過後の下流側に配置する。光学撮影に支障をきたさないようアクリルの可視化壁は極力薄い厚さにすると共に、光を反射しない材質で模擬燃料棒を造形し、その隙間から流路を撮影する。可視化領域は 130mm 設けており、スプレー上端 5mm の高さを撮影位置とする。

液滴付着を計測する際には流路内壁（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 2-4 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

実験装置の中で、テスト部に空気流を供給する機構を図 2-5 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。

空気流はマニホールドにより多孔板を通過してテスト部へ流入され、偏流が解消され迅速に整流となるよう施している。

2.1.4. 液滴射出部

実験装置の中で、テスト部に液滴を射出する機構を図 2-6 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センター体系とサイド体系の双方に 1 つずつ支持され、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、距離及び吐出圧力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。

ノズルは内径 0.3mm の細管に先端が尖状の直径 0.25mm の針金（共に SUS 製）が挿入され、さらに細管側は上端部を PFA チューブとしており、水の表面張力により針金の周囲に形成される液膜が上部に伝わり、針金先端において形状の整った液滴が射出される構造となっている。

2.1.5. 模擬スペーサ

本試験の評価対象として原子力規制庁との協議により選定した模擬スペーサを図 2-7 に示す。

丸セル型は、燃料棒との間隙（クリアランス）1.2mm、肉厚 0.5mm の円環が模擬燃料棒の周りに設置された構造である。また比較のため、サイドサブチャンネルにおいてフロータブが追加された型も評価対象とする。肉厚 0.5mm の鉛直角 45° に傾いた「く」の字型の構造物が、スペーサ上部のチャンネル壁に配置される。フロータブの寸法については文献⁵⁾を参考にして決定した。

グリッド型は、肉厚 0.5mm の格子が模擬燃料棒の間に設置された構造である。また比較のため、センターサブチャンネルにおいて旋回羽が追加された型も評価対象とする。肉厚 0.5mm の羽状構造物が、スペーサ上部の格子点を中心に仰角 60° で 4 枚交互に配置される。旋回羽の寸法については文献⁶⁾を参考にして決定した。

模擬スペーサの高さは全て 30mm とし、上記の寸法にて樹脂製で三次元造形される。

2.2. 計測系

本試験における計測項目は以下の 4 項目である。

- ① 気相温度
- ② 空気流（気相流速分布）
- ③ スペーサ通過後の液滴運動
- ④ スペーサ通過後の燃料棒表面への液滴付着

このうち、①は系圧力と共に、本試験における実験環境（大気圧・常温）の確認のために計測する。②は、テスト部流路において液滴の上昇を推進する空気の流動を把握するために計測する。③及び④が、液滴流へ及ぼすスペーサの影響を評価する計測である。本節では、②～④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（気相流速分布）

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）を用いることとし、ドイツ Lavision 社のパッケージシステム⁷⁸⁾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 2-8 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 2-9 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. スペーサ通過後の液滴運動

作動流体としてテスト部に射出する液滴の計測は、シャドウイメージングによる粒子追跡法（PTV: Particle Tracking Velocimetry）を用いる。空気流計測の PIV とハード機器（ドイツ Lavision 社のパッケージシステム⁷⁹⁾）を共有でき、その配置及びソフトウェアが異なる。表 2-3 に本計測システムの主要構成を示し、図 2-10 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及び撮影するカメラは、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。こうして流動径を計測すると共に、微小時間差で 2 枚の連続撮影を行い両者の差分により変位及び速度ベクトルを計測する。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 2-11 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。

2.2.3. スペーサ通過後の燃料棒表面への液滴付着

作動流体としてテスト部に射出された液滴がスペ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¹⁰⁾。表 2-4 に液膜センサの基本仕様を示し、図 2-12 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 System¹¹⁾）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 2-13 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。

2.3. 作動流体

本試験は、テスト部を上方向に流れる気相流と、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 $10\ \mu\text{m}$ 程度の微小なものである。
- 液滴流は、水を成分とする。液滴運動の計測には水道水を用いるが、液滴付着の計測に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	<ul style="list-style-type: none"> • 燃料集合体内模擬流路（センター体系、サイド体系） • 模擬スペーサ（丸セル型（+フロータブ）、グリッド型（+旋回羽）） • 液滴等発生器 • 気相流れ及び水流れ用の循環ループ、コンプレッサ、ポンプ、流量調節弁、計測系、制御系等
計測機器	<ul style="list-style-type: none"> • 液膜センサ（模擬燃料棒表面上に密に配置） • 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	<ul style="list-style-type: none"> • 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 液滴運動の計測システムの基本仕様

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

表 2-4 液膜センサの主要構成

項目	内容
基板寸法	約 50×500 mm
外層銅箔厚	12 μ m
表面処理	全面無電解金メッキ (Au0.03 μ m 以上, Ni3-5 μ m)
電極対数	12×128 対 正方配列
外部接続端子	60 ピン×3 箇所フレキシブルランパ 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

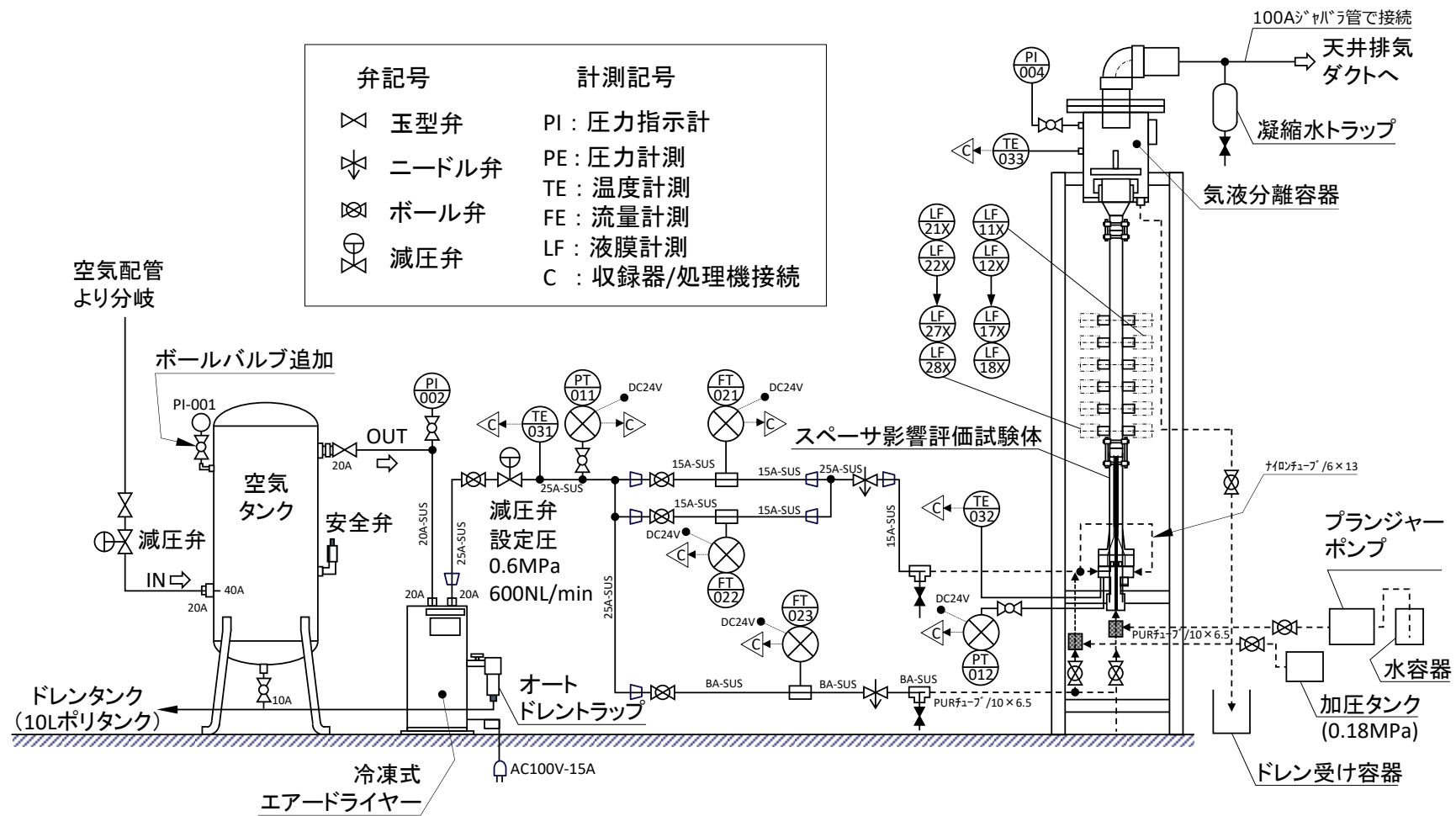


図 2-1 実験装置の全体概要

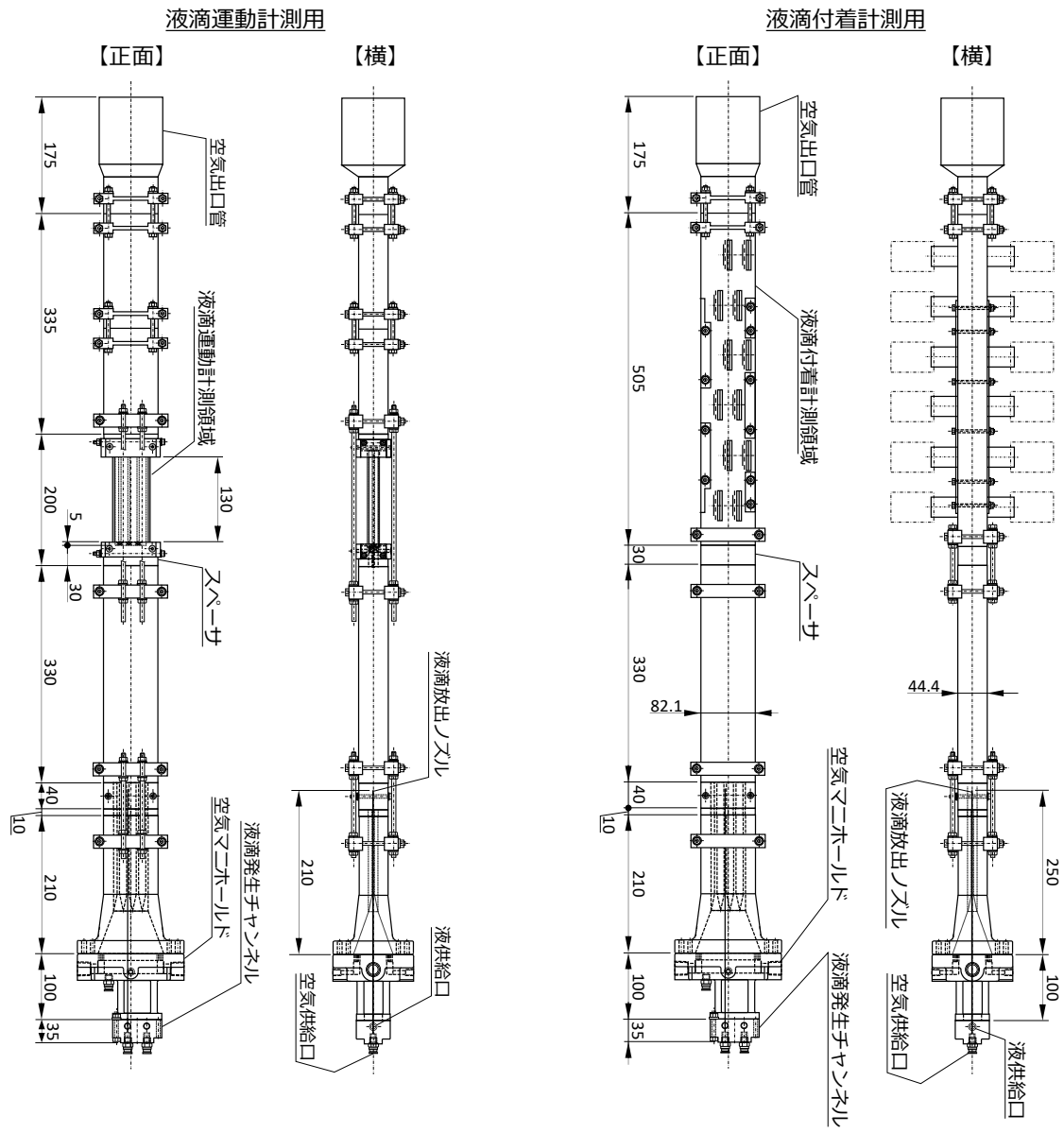


図 2-2 テスト部

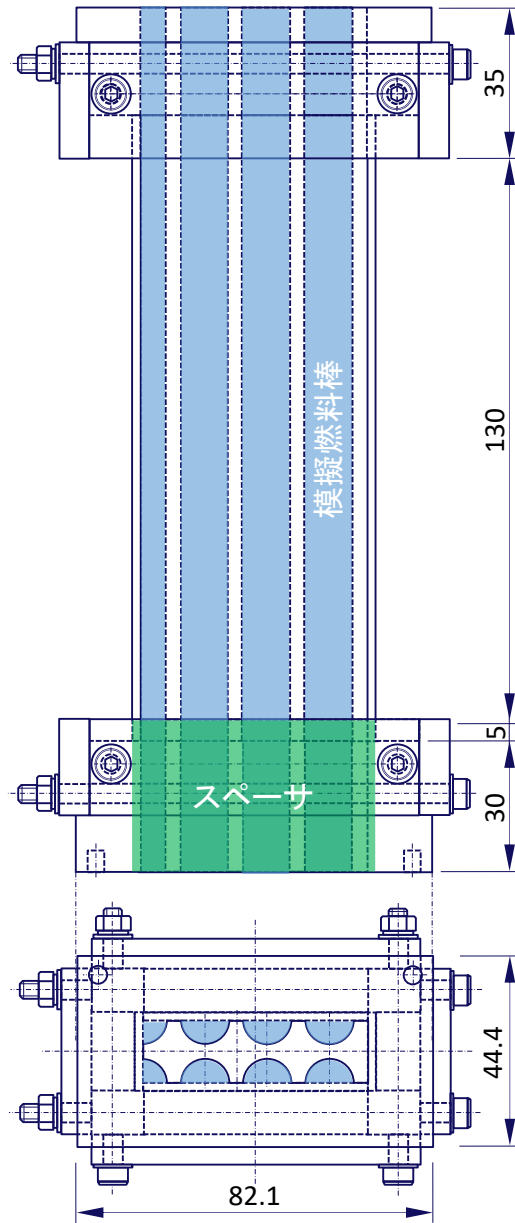


図 2-3 可視化流路

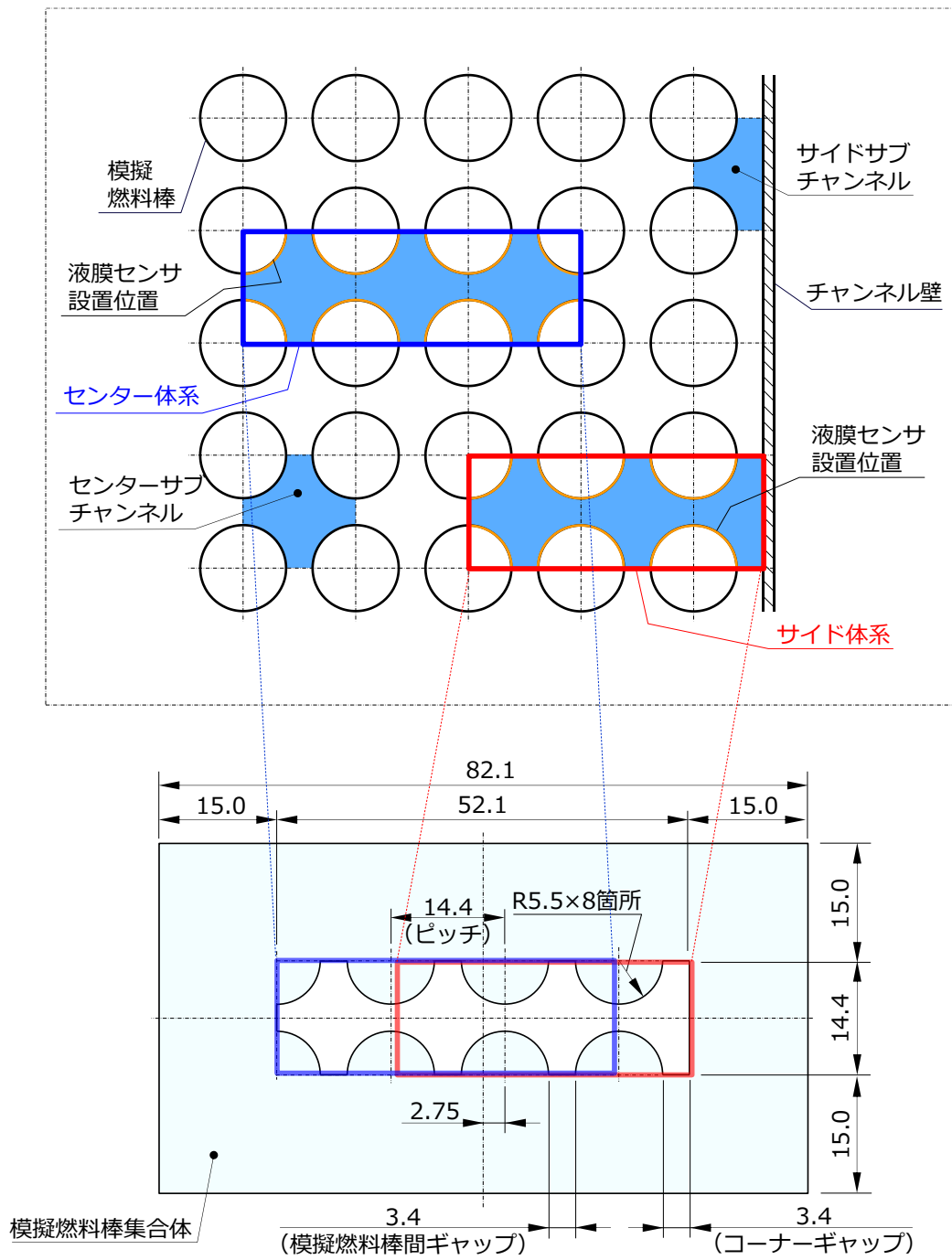


図 2-4 テスト部流路

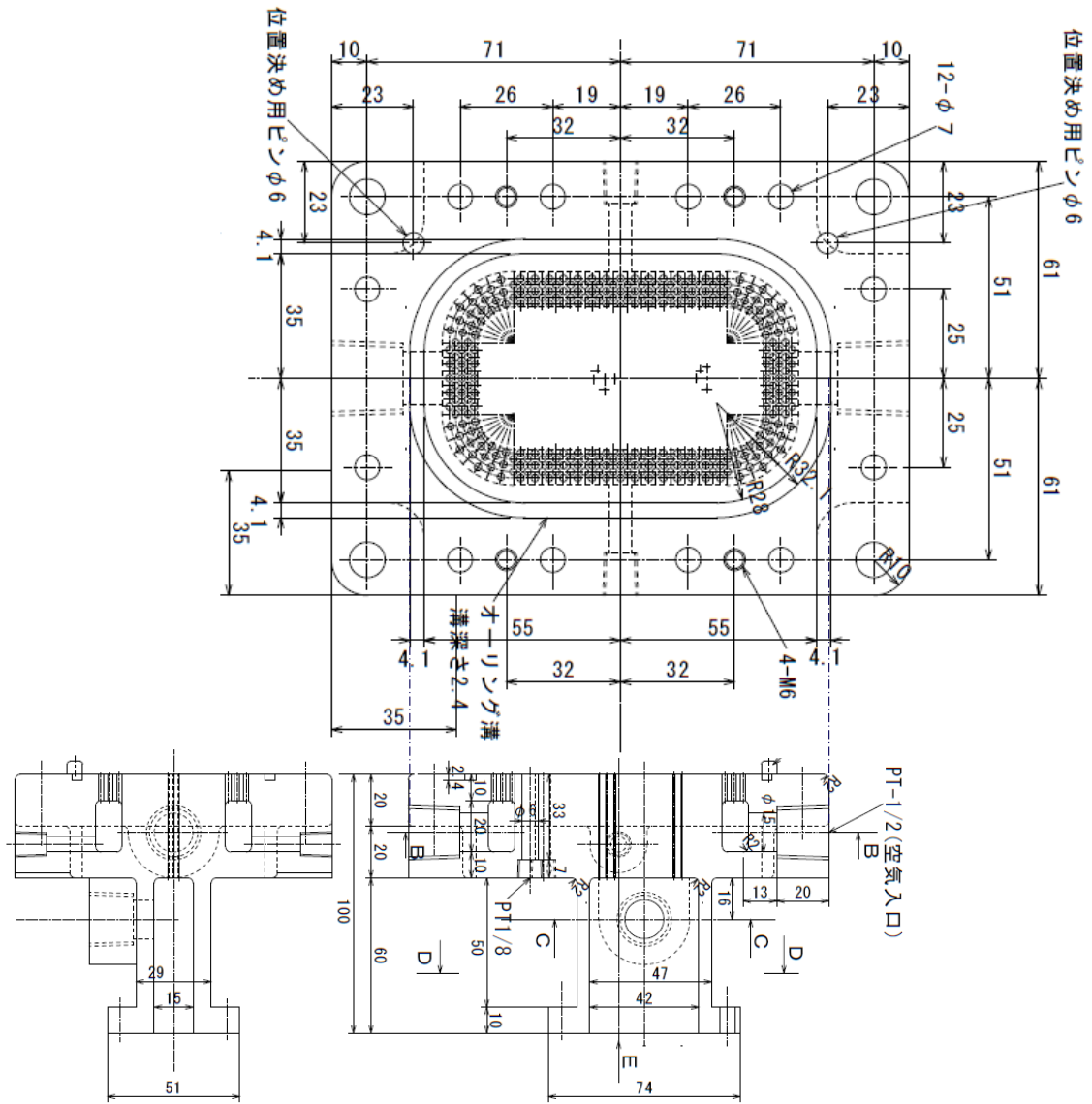


図 2-5 空気流供給部

先端拡大写真



- 針金 (φ0.25, 突出長さ2mm)
- PFAチューブ (φ0.5 × φ0.3)
- 継手 (熱収縮チューブ)
- SUSノズル (φ0.55 × φ0.3)

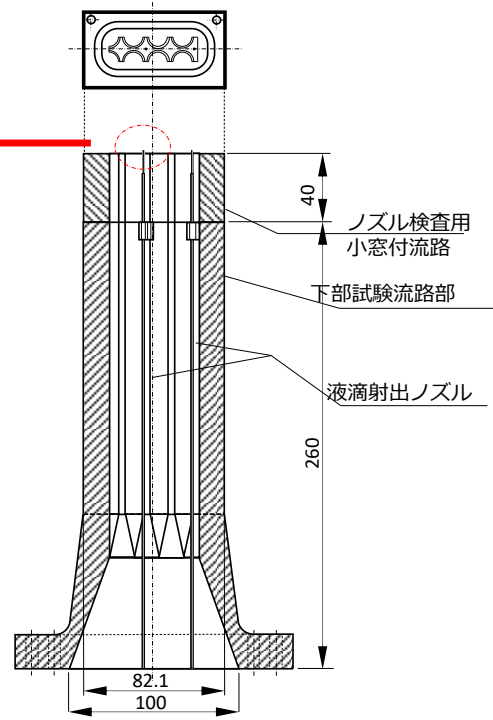
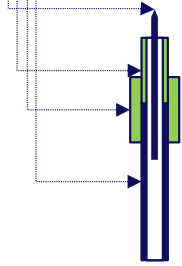


図 2-6 液滴射出部

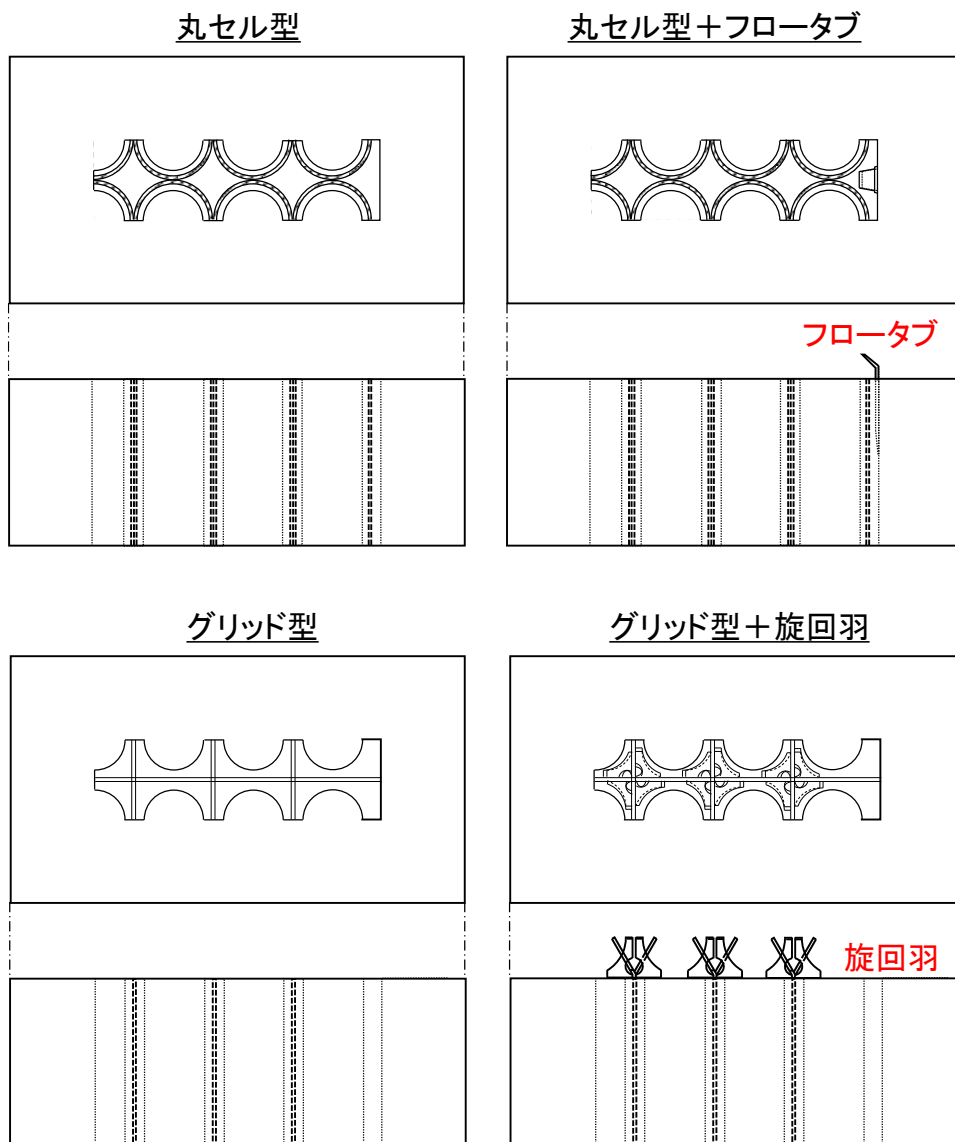


図 2-7 模擬スペーサ

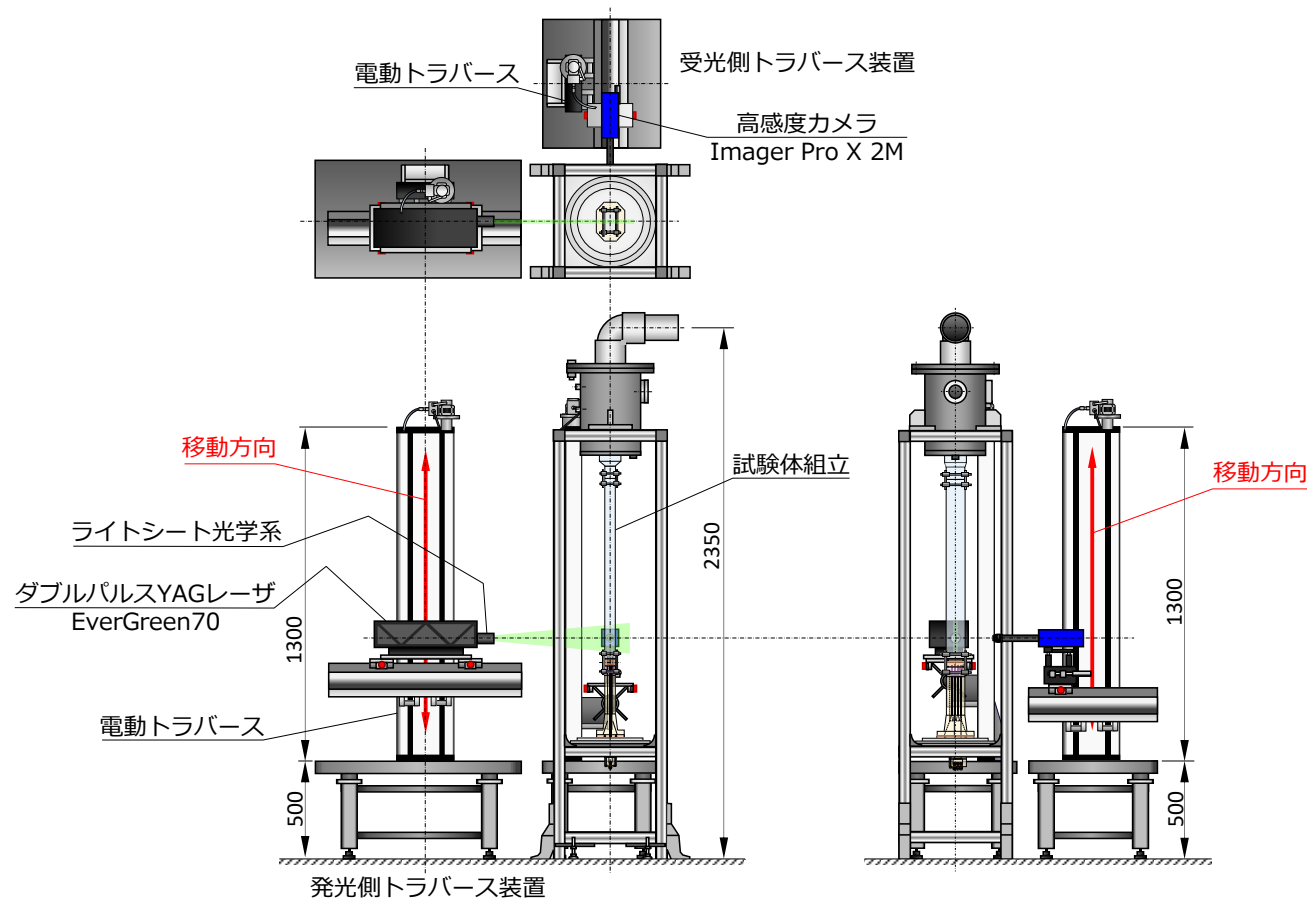


図 2-8 空気流計測：各ハード機器の配置

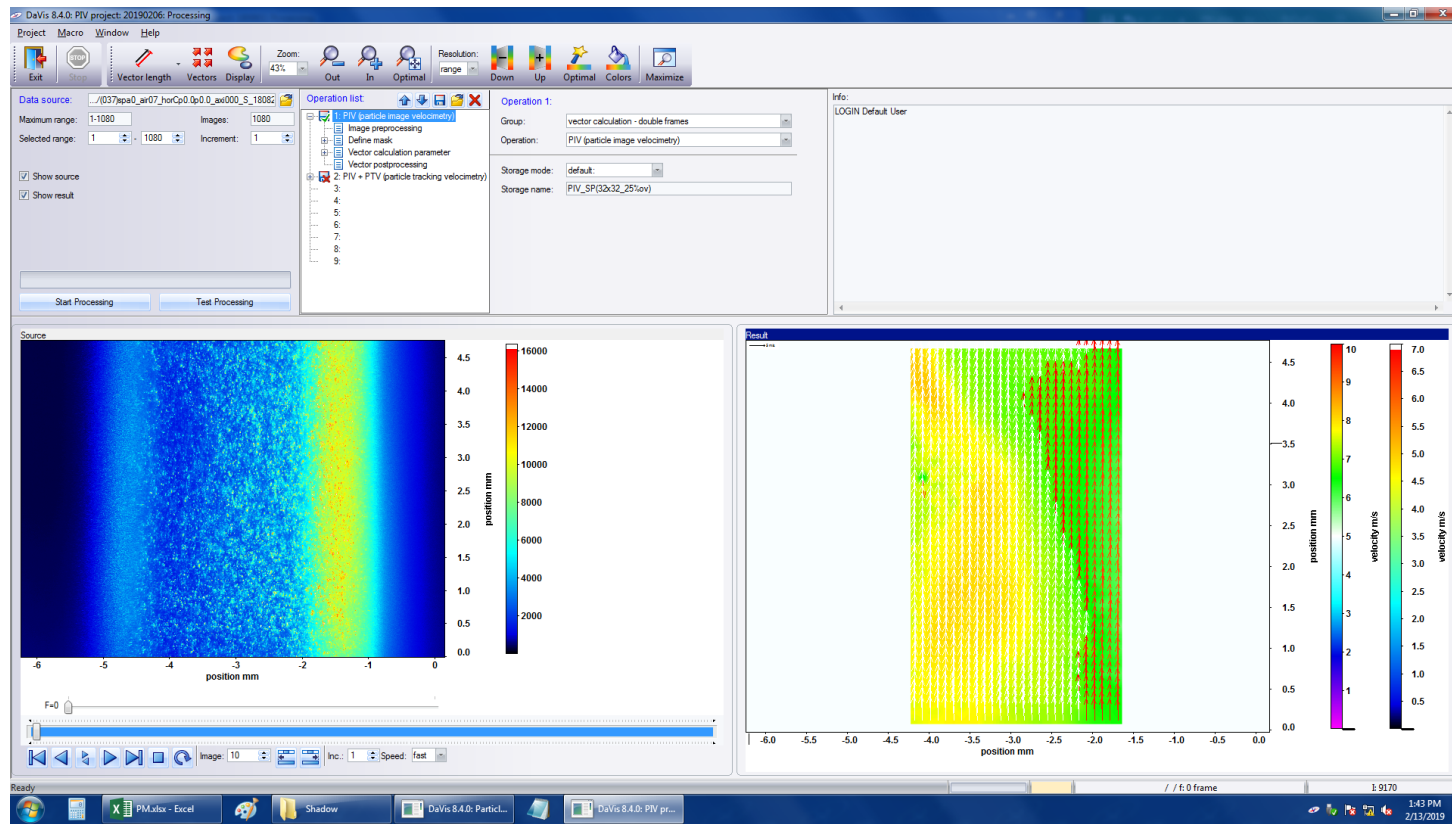


図 2-9 空気流計測：解析ソフトウェアのユーザーインターフェース

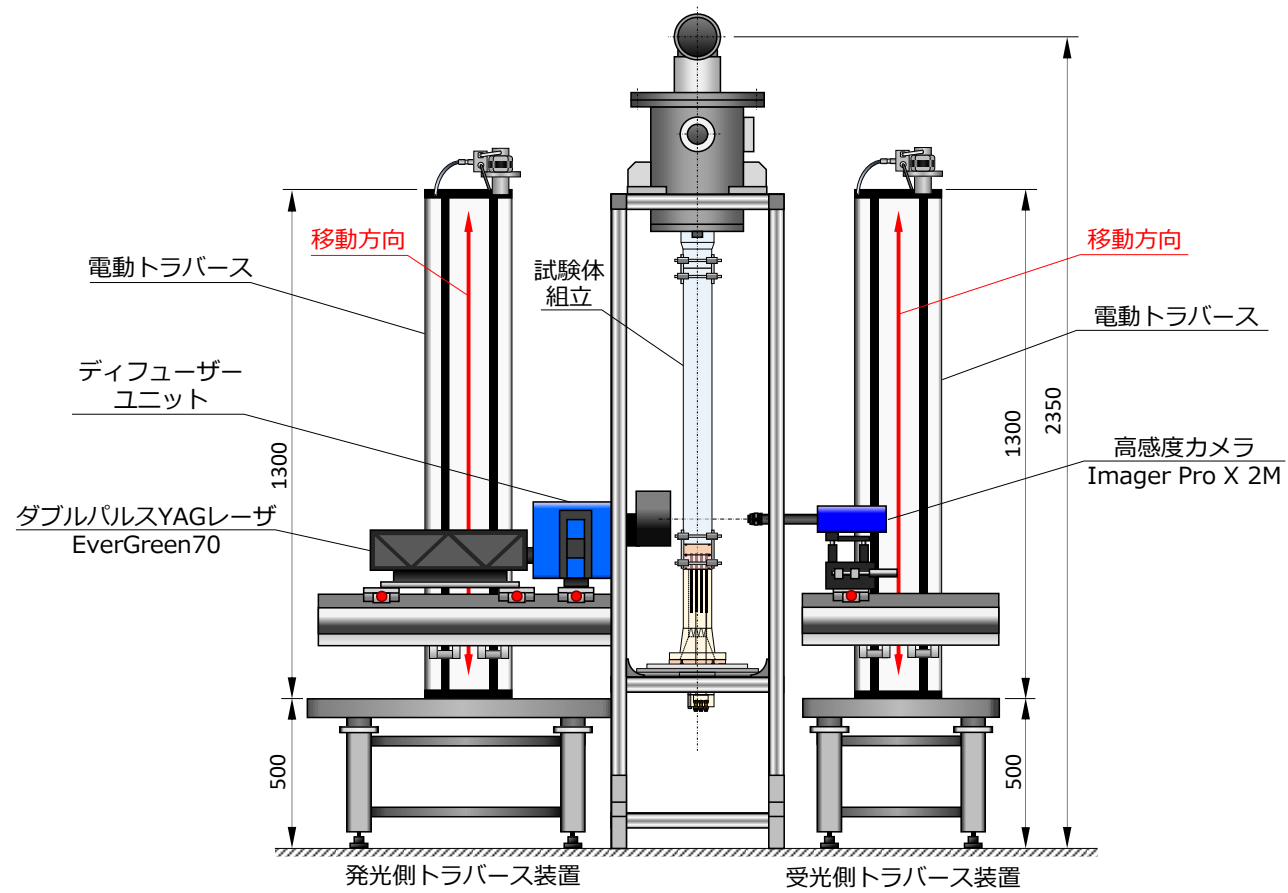


図 2-10 液滴運動の計測：各ハード機器の配置

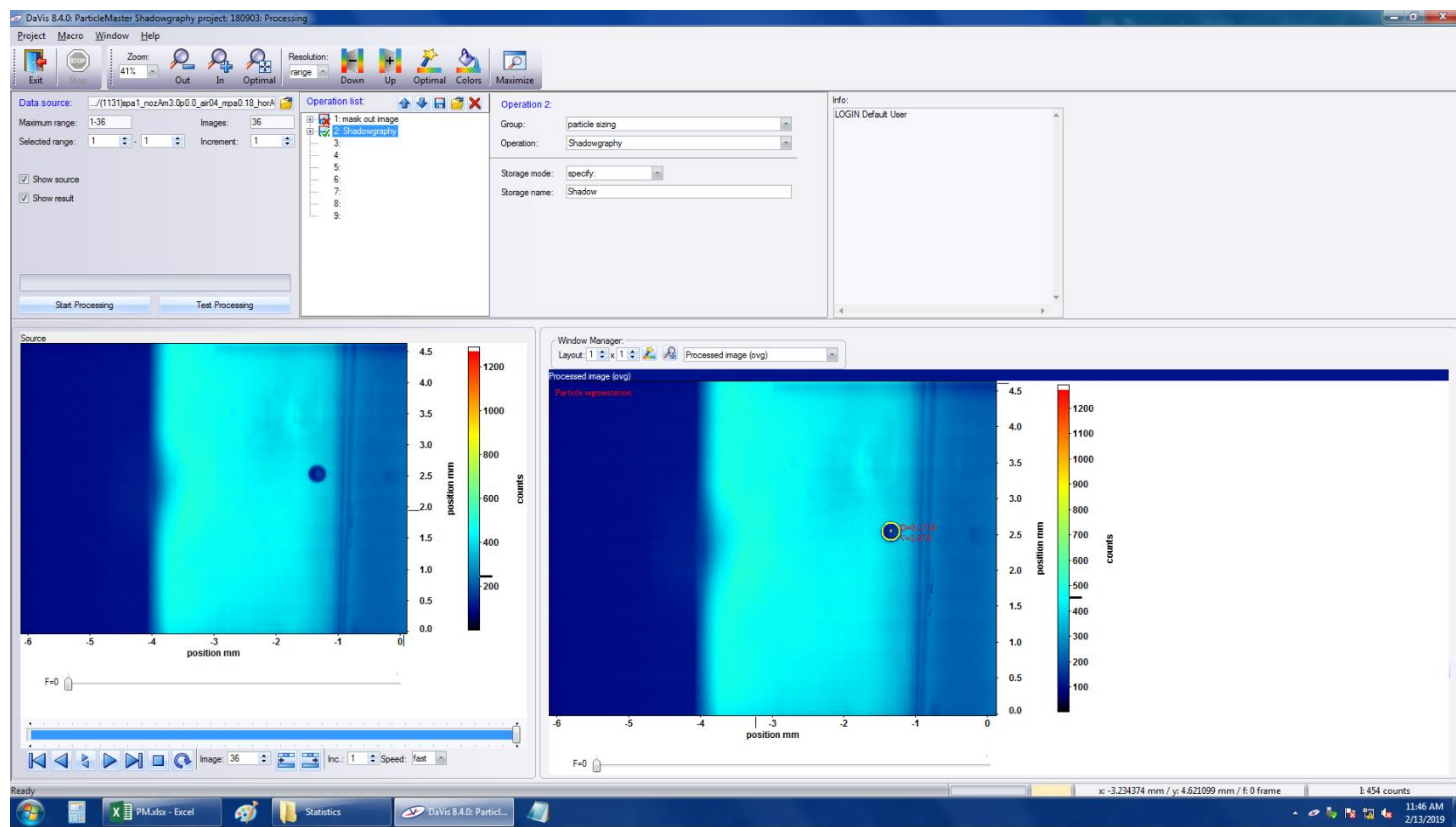


図 2-11 液滴運動の計測：解析ソフトウェアのユーザーインターフェース

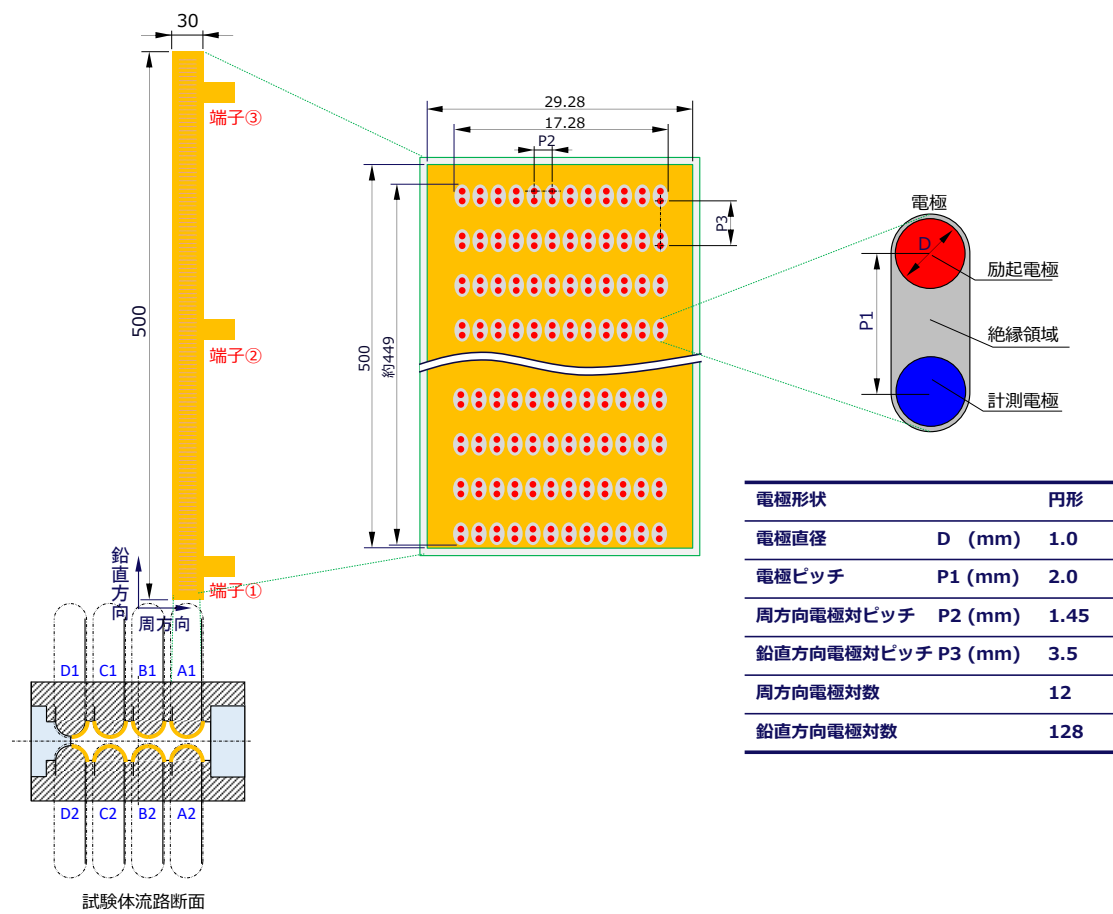


図 2-12 液滴付着の計測：液膜センサの主要構成と寸法

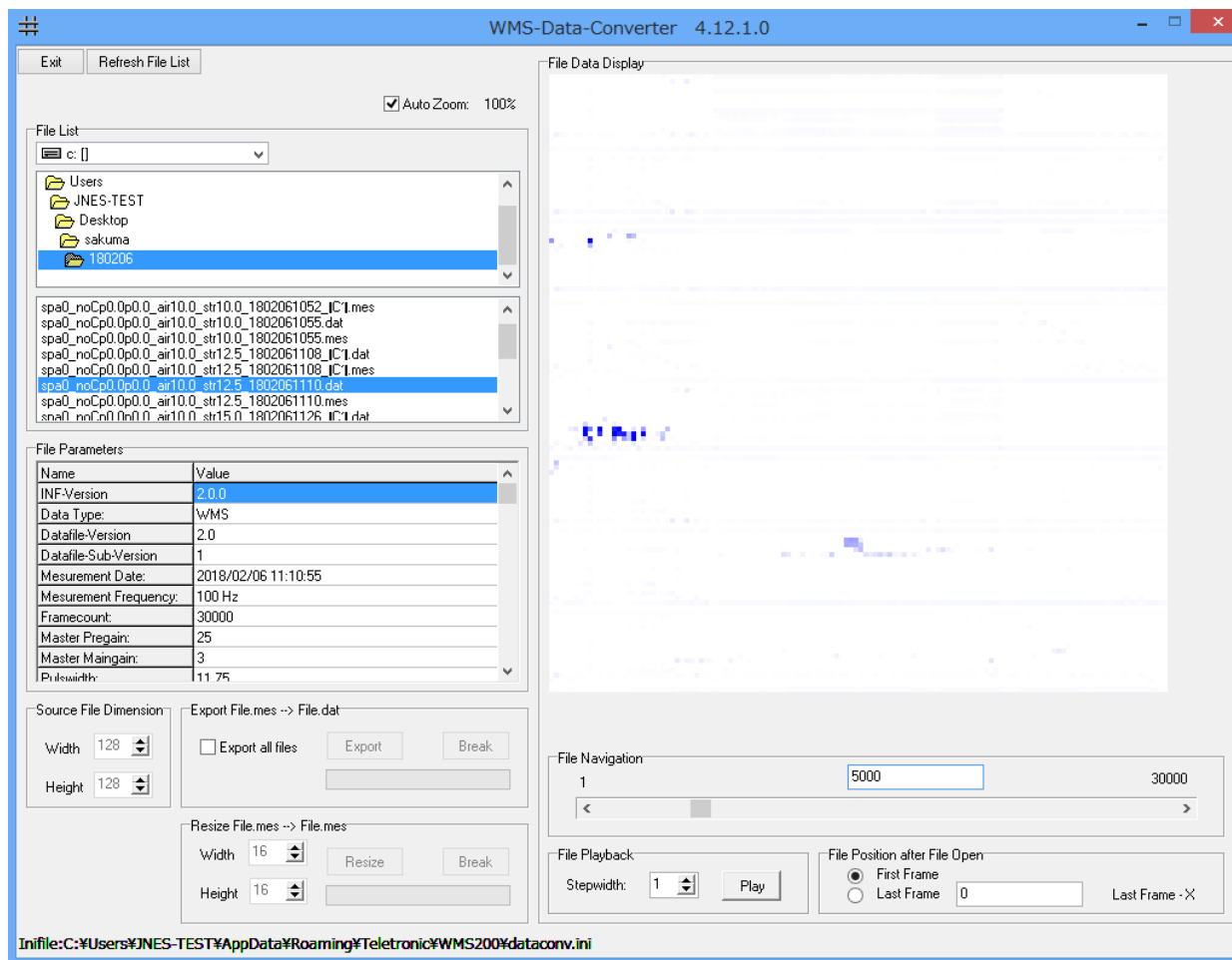


図 2-13 液滴付着の計測：WMS200 のユーザーインターフェース

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. 実験条件及び方法

本試験において、系圧力及び温度は特に制御せず、大気圧・常温状態を維持する。本試験で着目する実験パラメータを表 3-1 に示す。サブチャンネル体系及び模擬スプレー型の各々の組合せにおける特徴を見出すことを主眼とする。液滴を随伴する気相流（空気流）については、平均流速が指定値となるよう体積流量を調整する。液滴放出量については、液滴生成のための水を供給するプランジャーポンプの吐出圧を調整する。なお、模擬スプレーに付属する旋回羽及びフロータブについては、その付属による影響の感度を把握する目的であるため、気相（空気）平均流速 10m/s・液滴放出量 132mg/min の代表条件につき計測を行うものとする。

本節では、空気流・液滴運動・液滴付着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、並びに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。

3.1.1. 空気流（気相流速分布）

テスト部流路を流れる空気流は、実験パラメータとして設定される平均流速に相当する体積流量を入口から供給するが、その空気流のスプレー通過後における局所的な流動状況を確認する目的で計測される。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。

計測方法を図 3-1 に示し、計測に必要な設定項目を表 3-2 に示す。センター体系とサイド体系の各々について、スプレーに対して長辺方向から、スプレー直上より 5mm 上方にカメラ下端が位置するよう設定し、横 3mm×縦 4.5mm の領域が可視化領域として撮影される。本計測は時々刻々変動する流動状況を統計的に処理する必要があるため、1 条件につき 3 分間の計測を 2 回実施して合計 6 分間の時系列データを平均化する。

3.1.2. スプレー通過後の液滴運動

計測方法を図 3-2 に示し、計測に必要な設定項目を表 3-3 に示す。系圧力及び系温度を確認後、空気流を所定の平均流速になるような体積流量に空気タンク及び減圧弁を調整してテスト部に流入し、プランジャーポンプの駆動によりノズルから液滴射出を開始する。センター体系とサイド体系の各々について、スプレーに対して長辺方向から、スプレー直上より 5mm 上方にカメラ下端が位置するよう設定してフォーカスを調整した後、レーザーの照射と撮影を開始する。液滴の変位計測のための時間間隔は $2.5 \mu\text{s}$ 、それを時系列で繰り返す時間間隔は 12Hz と設定した。カメラ撮影と液滴通過のタイミングが合致する時にのみ液滴

画像が得られるため、実験条件 1 ケースにつき 5 分間の計測を 25 回繰り返してデータを蓄積した。

3.1.3. スペーサ通過後の燃料棒表面への液滴付着

計測方法を図 3-3 に示し、計測に必要な設定項目を表 3-4 に示す。系圧力及び系温度の確認から作動流体（空気流及び液滴）のテスト部への供給は前項と同様である。液滴射出を 10 分間継続し、10ms の間隔で液膜センサの各電極が検知する電位変化を計測し、実験条件 1 ケースにつき 5 回繰り返してデータを平均化処理した。

計測に先立ち、液膜センサにおけ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を実施した。具体的には、液膜センサが既知の液膜厚さで浸された状態を作り出せる治具を用い、複数の異なる液膜厚さで計測された電位をプロットし、液膜厚さと電位との関係式を導出した。

また、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、基板上の微細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 分間の電位計測を行い、その各電極の時間平均値を実験開始後の計測値からオフセットして調整を施した。

なお、試計測の段階で、液膜センサに一度付着した液滴は間もなく空気流により飛散し、その後は液膜センサで検知不能な微小サイズの噴霧となり、再度液膜センサで重複検知されないことを確認した。

本試験では、各センサで液膜厚さとして検知された値の計測時間内における累積値を求め、全センサの合計値に対する比率で規格化し、各センサ位置での液滴付着頻度として表すこととする。

3.2. 実験結果

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

各計測時における実験環境（系圧力及び温度）の平均値を、供給空気流量と共に表 3-5 に示す。概ね一定の大気圧・常温下で計測が行われていることが確認できる。

3.2.1. 空気流（気相流速分布）

スペーサ通過後のスペーサ直上における空気流について、各ケースにおける水平方向及び鉛直方向の流速、並びに乱流エネルギーの時間・空間平均値を表 3-6 に示す。また、速度ベクトル及び乱流統計量の空間分布を図 3-4 に示す。以下、計測結果の整理と考察について記す。

(1) センター体系

可視化領域の端側でやや計測精度の粗くなっているケースが幾つか見られるが、その領域を除くと、スペーサ無及び丸セル型の流速は概ね鉛直方向一様分布を示しており、レイノルズ応力も分布の顕著な偏りは見られない。双方共、計測

位置のサブチャンネル中心付近に障害物がなく、鉛直方向の主流成分が卓越することによるものと考えられ、流速の絶対値も設定平均流速よりも大きい値を示している。グリッド型は、中央部が低速で外側に向けて高速となっていく分布を示しており、低速領域は設定平均流速の50～60%程度となっている。これはサブチャンネル中心位置に格子の交差点があり、気相流の鉛直方向への障害物となっていることによるものと考えられる。また、気相流（空気流）の入口平均流速が小さいほど、中央部と周辺部との速度偏差が大きく且つより下流側に偏差領域が及んでいることが分かる。グリッド型に旋回羽が付属したケースでは、速度ベクトルが全般的に斜め方向に傾き、その方向に概ね沿う形で高速領域と低速領域の境界が見られる。流速の絶対値は全般的に設定平均流速を下回っており、旋回羽が気相流の鉛直方向流動に対して強い制動作用を有することを示している。

(2) サイド体系

センター体系と同様に可視化領域の端側でやや計測精度の粗くなっているケースが幾つか見られるが、その領域を除くと、スパーサ無及び丸セル型の流速は右側領域に低速側へシフトする勾配が見られ、その領域でレイノルズ応力も高くなっている。これはチャンネル壁による影響と考えられ、その近傍では設定平均流速を下回り、左側領域では逆に上回っている。グリッド型ではセンター体系で見られた水平方向の流速勾配が見られないが、これはサイド体系の場合にはサブチャンネルの中央に格子が存在しないためであり、水平方向はチャンネル壁近傍を除くと概ね一様分布で、鉛直方向には下流側に向かって僅かに流速勾配がついている。レイノルズ応力はチャンネル壁側で低く燃料棒側で高い傾向となっている。丸セル型にフロータブが付属したケースでは、その流路障害によってスパーサ直上の上流領域の速度ベクトルはほぼ水平方向になり、燃料棒側に回り込んで逆流を生じるほどの偏流が生成されている。フロータブの上部では逆に障害の取り払われた領域に気相流が流れ込む格好となり、鉛直方向に加速される領域が見られる。ただし、全般的に気相流には制動作用が働き、設定平均流速よりも小さくなっている。

3.2.2. スパーサ通過後の液滴運動

スパーサ通過後のスパーサ直上における液滴運動について、各ケースにおける液滴径と鉛直方向速度及び水平方向速度、並びに液滴観測位置との関係を図3-5に示す。計測全般にわたって液滴径は約 $20\mu\text{m}$ ～ $400\mu\text{m}$ の範囲であり、 $100\mu\text{m}$ 未満の割合が多いものの、この範囲で概ね満遍なく液滴径が網羅されている。文献¹²⁾では環状噴霧流における液滴の観測において径が約 $50\mu\text{m}$ をピークとして最小を約 $20\mu\text{m}$ 、最大を $300\sim 400\mu\text{m}$ としたガンマ分布に近い整理がなされており、また文献¹³⁾ではBWR条件での環状噴霧流の解析に際して液滴径を $10\sim 400\mu\text{m}$ のガンマ分布として条件設定している。こうした事例から、本試験で計測された液滴径は全般にわたって有意であると言える。以下、計測結果の整理と考察について記す。

(1) センター体系

① スペーサ無

鉛直方向の液滴速度は液滴径に概ね比例して低下しており、直線的相関が見られる。これはスペーサ効果のない場合、液滴の慣性に伴う挙動が支配的に表れていると考えられる。水平方向の液滴速度は 0m/s 近傍に集中しているが、液滴径 0.1mm 未満の小液滴は±両側のばらつきがやや大きい。設定平均流速による違いは、鉛直方向の液滴速度に見られる直線的相関の勾配が設定平均流速の高いほど急峻になる傾向と、水平方向の液滴速度のばらつきが設定平均流速の高いほど抑えられている傾向として表れている。液滴放出量による違いは、観測される液滴径の分布が液滴放出量の小さいほど大きい径の分布密度が高くなっているが、液滴速度に対する影響は見られない。

② 丸セル型

鉛直方向の液滴速度は、液滴径 0.1mm 未満では径が小さくなるほど急激に高速化する効果が見られる。液滴径 0.1mm 以上ではスペーサ無と概ね同じ傾向である。水平方向の液滴速度は、スペーサ無と同じ傾向である。設定平均流速と液滴放出量による違いは、①と概ね同様の傾向が見られる。

③ グリッド型

鉛直方向の液滴速度は、液滴径 0.1mm 未満では低速側に大きくばらつきが広がる効果が見られる。液滴径 0.1mm 以上ではスペーサ無と概ね同じ傾向である。水平方向の液滴速度は、スペーサ無との顕著な差異は見られない。設定平均流速と液滴放出量による違いは、①と概ね同様の傾向が見られる。

④ グリッド型+旋回羽

鉛直方向の液滴速度は、グリッド型のみよりもさらに液滴径全般に対して低速側に大きくばらつきが広がる効果が見られる。水平方向の液滴速度は、液滴径全般に対してスペーサ無よりもばらつきが±両側に 2 倍程度広がる効果が見られる。

(2) サイド体系

① スペーサ無

鉛直方向の液滴速度はセンター体系と同様の傾向だが、若干低速側にシフトしている。これは液滴を運搬する気相流分布がチャンネル壁の近傍で低速のためと思われる。水平方向の液滴速度はセンター体系と異なり、小液滴のみならず液滴径全般に対してばらつきが大きい傾向にある。設定平均流速による違いは、鉛直方向の液滴速度に見られる直線的相関の勾配が設定平均流速の高いほど急峻になる傾向がセンター体系と同様に見られるが、水平方向の液滴速度のばらつきは設定平均流速の違いに関わらず概ね同じような分布を示している。液滴放出量による違いはセンター体系と同様、観測される液滴径の分布が液滴放出量の小さいほど大きい径の分布密度が高くなっているが、液滴速度に対する影

響は見られない。

②丸セル型

鉛直方向の液滴速度は、センター体系と同様、液滴径 0.1mm 未満で径が小さくなるほど急激に高速化する効果が見られる。水平方向の液滴速度は、スぺーサ無との顕著な差異は見られない。設定平均流速と液滴放出量による違いは、①と概ね同様の傾向が見られる。

③丸セル型＋フロータブ

鉛直方向の液滴速度は、丸セル型のみに見られた効果は無くなり、液滴径全般に対して低速側にばらつきが広がる効果が見られる。水平方向の液滴速度は、スぺーサ無との顕著な差異は見られない。設定平均流速と液滴放出量による違いは、①と概ね同様の傾向が見られる。

④グリッド型

鉛直方向の液滴速度は、センター体系で見られた効果は無くなり、スぺーサ無と概ね同じ傾向となっている。水平方向の液滴速度は、スぺーサ無との顕著な差異は見られない。

3.2.3. スぺーサ通過後の燃料棒表面への液滴付着

スぺーサ通過後の模擬燃料棒表面への液滴付着について、各ケースにおける液滴付着頻度と分布状況を図 3-6 に示す。ここでは、サブチャンネル流路を構成する模擬燃料棒（センター体系の場合は 4 つ、サイド体系の場合は 2 つ）の対称性に鑑みて、各表面の計測データを統合して整理している。また、液滴のクロスフローにより隣接サブチャンネルの模擬燃料棒に付着した割合を表 3-7 に示す。以下、計測結果の整理と考察について記す。

(1) センター体系

①スぺーサ無

スぺーサ効果のない場合には、広範囲にわたり付着分布が見られ、上流側から下流側に向かうほど付着頻度は小さくなる。この傾向は、気相流速及び液滴放出量による違いは見られなかった。クロスフローも条件による影響は見られず、概ね 30～40%である。

②丸セル型

スぺーサ無との顕著な差異は見られないが、スぺーサ直上から 30mm 程度までの範囲及び 140mm 近傍で付着頻度及び分布が若干大きくなる効果が見られる。また、気相流速が大きいほど上流側に比較的まとまった範囲で分布し、小さいほど下流側にばらつきが拡大するような傾向が見られる。液滴放出量による違いは見られなかった。クロスフローも条件による影響は見られず、概ね 30～40%である。

③グリッド型

スぺーサ無との顕著な差異は見られないが、スぺーサ直上近傍及び約 50mm 近傍で付着頻度及び分布が集中する効果が見られる。また、丸セル型と同様、気相流速が大きいほど上流側に比較的まとまった範囲で分布し、小さいほど下流側にばらつきが拡大するような傾向が見られる。液滴放出量による違いは見られなかった。クロスフローも条件による影響は見られず、概ね 30%前後である。

④グリッド型+旋回羽

スぺーサから 140mm 程度までの範囲に付着が集中する効果が見られる。また、グリッド型のみよりも付着分布が広がる効果が見られる。クロスフローは他のタイプのスぺーサと同様 30~40%の範囲内である。

(2) サイド体系

①スぺーサ無

センター体系と異なり、スぺーサから 140mm 程度の範囲に付着が集中する。その範囲において、上流側から下流側に向かうほど付着頻度は小さくなる。この傾向は、気相流速及び液滴放出量による違いは見られなかった。クロスフローも条件による影響は見られず、概ね 20~30%である。

②丸セル型

センター体系と異なり、スぺーサ直上近傍の付着頻度が集中する効果が見られ、スぺーサ無の場合やグリッド型よりも狭い範囲に集中している。一方、気相流速が小さいほど下流側に分散した分布が見られるのは、センター体系と同様の傾向である。クロスフローはスぺーサ無の場合より若干小さく、10~20%の範囲である。

③丸セル型+フロータブ

丸セル型のみ傾向に加えて、スぺーサから 140mm 程度までの範囲において、模擬燃料棒表面 (1/4 円周) の中央部に偏重し、高さ方向には均等に付着する効果が見られる。また、クロスフローも他の条件と比較して極端に小さく、7%程度である。

④グリッド型

スぺーサ無との顕著な差異は見られないが、丸セル型と同様、気相流速が小さいほど下流側に分散した分布が見られる。クロスフローは条件によって偏差が大きく、約 10~30%の範囲である。

3.3. 分析・考察

サブチャンネル流路における各種スぺーサを通過後の液滴挙動の可視観察を通じて、以下の知見を得た。

いずれの型のスぺーサでも、よりスぺーサ近傍領域での付着頻度を増加させる効果を有するが、その分布の集中度はサブチャンネル体系やスぺーサ型によ

り異なる特徴があり、全般的にサイド体系においてスぺーサ近傍の集中度がより高くなる。

また、液滴径が小さい領域で、スぺーサ型により異なる特徴的な挙動を示すようになる。丸セル型では、径が小さくなるほど急激に鉛直方向速度が高くなる。ただし、サイド体系においてフロータブが付くとその効果は打ち消され、液滴径全般において低速側にばらつきが増大する。グリッド型では、鉛直方向速度が低速側にばらつきが増大する。さらに、センター体系において旋回羽が付くとそのばらつきは液滴径全般に拡大する。

丸セル型の場合、下方から流入してスぺーサに衝突し迂回する空気流の大部分はサブチャンネルの中心に向かって集中し、加速される。そのような気相流に輸送される液滴は、スぺーサ内部領域においてスぺーサに付着し難く多くの割合が流れ場に残り、且つ高速でスぺーサを通過するものと考えられる。

グリッド型の場合、下方から流入してスぺーサに衝突し迂回する空気流は、燃料棒のある外向きに分散される。そのため、そのような気相流に輸送される液滴はスぺーサ内部領域で燃料棒に付着しやすく、スぺーサを通過する割合が小さくなる。またスぺーサを通過する液滴も、壁面近傍の流れ場の影響を受け低い流速となるものと考えられる。

スぺーサに旋回羽やフロータブが付属する場合、液滴流速の鉛直成分が抑制され水平成分に大きく分散されるため、燃料棒のスぺーサに近い部分に付着しやすい傾向が見られるが、そうした効果が見られる範囲はあまり下流側に及んではない。本試験で採用した形状や寸法を見直してその影響や感度を明確化することが必要である。

表 3-1 実験パラメータ

項目	内容
サブチャンネル体系	センター体系／サイド体系
模擬スプレーサ型	スプレーサ無（比較参考のため）／丸セル型／グリッド型／グリッド型＋旋回羽（センター体系のみ）／丸セル型＋フロータブ（サイド体系のみ）
気相（空気）平均流速 ^{※1}	10m/s／7m/s／4m/s
液滴放出量 ^{※2}	132mg/min／144mg/min／163mg/min

※1 平均流速は、供給体積流量をテスト部流路断面積で除した値

※2 液滴放出量は、プランジャーポンプの吐出圧力が各々0.27MPa, 0.23MPa, 0.18MPaに相当する値

表 3-2 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 3-3 スペーサ通過後の液滴運動の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

表 3-4 スペーサ通過後の燃料棒表面への液滴付着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℃)

表 3-5 実験環境（系圧力及び温度）の計測結果
 (1/7：空気流（気相流速分布）)

実験条件			系圧力 平均値 [kPag]	系温度 平均値 [°C]	空気流量 平均値 [L/min]
設定空気流速 [m/s]	サブチャンネル	スぺーサ 種類			
10m/s	センター	無	0.041	12.0	255.0
		丸セル	0.045	11.8	254.3
		グリッド	0.043	11.7	254.8
	サイド	グリッド+旋回羽	0.058	12.4	254.3
		無	0.052	11.7	254.7
		丸セル	0.055	12.1	254.6
		グリッド	0.044	11.7	254.5
		丸セル+フロータブ	0.054	12.1	254.3
7m/s	センター	無	0.052	13.2	179.7
		丸セル	0.038	13.0	178.8
		グリッド	0.038	12.8	179.1
	サイド	無	0.050	13.1	179.4
		丸セル	0.041	13.0	179.7
		グリッド	0.029	12.4	179.9
4m/s	センター	無	0.058	14.5	105.3
		丸セル	0.040	14.4	105.1
		グリッド	0.040	14.5	105.8
	サイド	無	0.048	14.3	104.1
		丸セル	0.050	14.4	104.2
		グリッド	0.041	14.0	104.6

表 3-5 実験環境（系圧力及び温度）の計測結果
 (2/7：スプレーサ通過後の液滴運動 [1/3])

実験条件				系圧力 平均値 [kPag]	系温度 平均値 [°C]	空気流量 平均値 [L/min]	
液滴放出量 [mg/min]	設定空気流 速[m/s]	サブチャン ネル	スプレーサ 種類				
132mg/min	10m/s	センター	無	0.199	21.7	246.6	
			丸セル	0.108	22.8	246.7	
			グリッド	0.033	22.0	251.8	
			グリッド+旋回羽	0.386	22.3	252.8	
	7m/s	センター	サイド	無	0.130	20.7	251.3
				丸セル	0.033	22.6	253.4
				グリッド	0.031	18.9	252.5
				丸セル+フロータブ	0.051	18.9	251.6
	4m/s	センター	サイド	無	0.244	22.1	178.2
				丸セル	0.109	22.8	177.3
				グリッド	0.047	21.9	177.8
				丸セル	0.031	21.9	176.1
4m/s	センター	サイド	無	0.081	20.2	176.6	
			丸セル	0.031	21.9	176.1	
			グリッド	0.040	18.4	177.0	
			丸セル	0.031	21.9	176.1	
4m/s	センター	サイド	無	0.165	21.8	103.1	
			丸セル	0.201	23.0	102.0	
			グリッド	0.063	21.9	103.0	
			丸セル	0.023	22.1	102.5	
4m/s	センター	サイド	丸セル	0.038	22.1	102.6	
			グリッド	0.045	18.5	96.4	

表 3-5 実験環境（系圧力及び温度）の計測結果
 (3/7：スパーサ通過後の液滴運動 [2/3])

実験条件				系圧力 平均値 [kPag]	系温度 平均値 [°C]	空気流量 平均値 [L/min]
液滴放出量 [mg/min]	設定空気流 速[m/s]	サブチャン ネル	スパーサ 種類			
144mg/min	10m/s	センター	無	0.244	21.6	251.8
			丸セル	0.289	22.4	252.3
			グリッド	0.057	21.5	252.4
		サイド	無	0.046	21.4	252.5
			丸セル	0.073	22.3	252.1
			グリッド	0.079	21.9	252.3
7m/s	7m/s	センター	無	0.267	22.0	174.8
			丸セル	0.300	22.6	174.2
			グリッド	0.073	22.7	177.2
		サイド	無	0.060	21.0	177.5
			丸セル	0.067	21.8	176.6
			グリッド	0.084	22.1	177.5
4m/s	4m/s	センター	無	0.278	22.9	103.1
			丸セル	0.410	22.7	102.5
			グリッド	0.082	23.0	102.7
		サイド	無	0.062	21.0	102.9
			丸セル	0.067	21.4	102.7
			グリッド	0.096	21.8	98.0

表 3-5 実験環境（系圧力及び温度）の計測結果
 (4/7：スプレーサ通過後の液滴運動 [3/3])

実験条件				系圧力 平均値 [kPag]	系温度 平均値 [°C]	空気流量 平均値 [L/min]	
液滴放出量 [mg/min]	設定空気流 速[m/s]	サブチャン ネル	スプレーサ 種類				
163mg/min	10m/s	センター	無	0.109	22.6	252.8	
			丸セル	0.087	22.5	252.6	
			グリッド	0.085	22.7	252.5	
	7m/s	センター	サイド	無	0.064	21.0	252.6
			丸セル	0.043	20.8	252.3	
			グリッド	0.051	22.5	250.9	
4m/s	7m/s	センター	無	0.167	21.8	177.3	
			丸セル	0.137	22.7	175.0	
			グリッド	0.098	22.6	177.6	
	4m/s	センター	サイド	無	0.067	21.3	176.7
			丸セル	0.058	21.2	175.2	
			グリッド	0.058	21.1	178.2	
4m/s	4m/s	センター	無	0.184	21.8	104.3	
			丸セル	0.145	22.8	103.8	
			グリッド	0.073	23.0	102.1	
	4m/s	センター	サイド	無	0.058	20.4	102.6
			丸セル	0.045	22.0	99.2	
			グリッド	0.054	21.1	102.7	

表 3-5 実験環境（系圧力及び温度）の計測結果
 (5/7：スプレーサ通過後の燃料棒表面への液滴付着 [1/3])

実験条件				系圧力 平均値 [kPag]	系温度 平均値 [°C]	空気流量 平均値 [L/min]
液滴放出量 [mg/min]	設定空気流 速[m/s]	サブチャン ネル	スプレーサ 種類			
132mg/min	10m/s	センター	無	0.036	21.3	252.8
			丸セル	0.027	22.0	252.8
			グリッド	0.025	20.4	252.3
			グリッド+旋回羽	0.041	21.4	252.8
		サイド	無	0.239	22.5	252.3
			丸セル	0.152	22.4	252.4
			グリッド	0.114	22.5	250.9
			丸セル+フロータブ	0.225	21.4	252.7
	7m/s	センター	無	0.038	21.1	177.9
			丸セル	0.036	22.4	178.6
			グリッド	0.022	21.0	177.1
		サイド	無	0.224	21.8	178.2
			丸セル	0.229	22.6	175.6
			グリッド	0.126	22.2	174.7
	4m/s	センター	無	0.036	20.9	102.5
			丸セル	0.043	21.0	103.0
			グリッド	0.019	21.3	99.7
		サイド	無	0.225	20.7	103.0
			丸セル	0.128	21.9	102.3
			グリッド	0.112	21.7	103.8

表 3-5 実験環境（系圧力及び温度）の計測結果
 (6/7：スプレーサ通過後の燃料棒表面への液滴付着 [2/3])

実験条件				系圧力 平均値 [kPag]	系温度 平均値 [°C]	空気流量 平均値 [L/min]	
液滴放出量 [mg/min]	設定空気流 速[m/s]	サブチャン ネル	スプレーサ 種類				
144mg/min	10m/s	センター	無	0.038	20.8	252.8	
			丸セル	0.039	21.4	251.3	
			グリッド	0.022	20.8	253.0	
	7m/s	センター	サイド	無	0.247	22.3	250.8
			丸セル	0.126	22.5	250.7	
			グリッド	0.189	22.5	253.0	
4m/s	7m/s	センター	無	0.038	21.1	172.4	
			丸セル	0.054	21.7	178.0	
			グリッド	0.022	21.0	177.5	
	4m/s	センター	サイド	無	0.270	21.7	176.0
			丸セル	0.096	22.7	178.4	
			グリッド	0.155	22.0	178.5	
	4m/s	センター	無	0.033	21.0	102.9	
			丸セル	0.030	23.3	102.4	
			グリッド	0.024	21.0	103.4	
		サイド	無	0.239	21.0	102.1	
			丸セル	0.091	22.5	102.4	
			グリッド	0.133	20.7	100.5	

表 3-5 実験環境（系圧力及び温度）の計測結果
 (7/7 : スペーサ通過後の燃料棒表面への液滴付着 [3/3])

実験条件				系圧力 平均値 [kPag]	系温度 平均値 [°C]	空気流量 平均値 [L/min]
液滴放出量 [mg/min]	設定空気流 速[m/s]	サブチャン ネル	スペーサ 種類			
163mg/min	10m/s	センター	無	0.032	21.0	252.9
			丸セル	0.037	22.1	253.6
			グリッド	0.032	21.1	252.3
		サイド	無	0.260	21.6	252.9
			丸セル	0.044	22.3	252.7
			グリッド	0.230	22.1	252.0
	7m/s	センター	無	0.034	21.1	179.1
			丸セル	0.047	22.2	177.4
			グリッド	0.030	20.7	177.8
		サイド	無	0.251	20.3	177.4
			丸セル	0.057	22.5	173.3
			グリッド	0.202	21.6	178.2
	4m/s	センター	無	0.027	21.1	103.5
			丸セル	0.049	22.2	102.7
			グリッド	0.020	20.8	103.3
		サイド	無	0.210	19.1	101.9
			丸セル	0.066	22.8	98.7
			グリッド	0.193	21.1	102.8

表 3-6 空気流計測：速度並びに乱流エネルギーの時間・空間平均値

実験条件			流速 (水平方向) [m/s]	流速 (鉛直方向) [m/s]	乱流エネルギー [(m/s) ²]
設定空気流速 [m/s]	サブチャンネル	スペーサ 種類			
10m/s	センター	無	0.049	8.457	1.469
		丸セル	0.072	13.798	0.364
		グリッド	-0.089	8.060	1.318
	サイド	グリッド+旋回羽	1.821	4.510	9.193
		無	0.081	6.998	2.723
		丸セル	0.144	13.115	0.470
		グリッド	-0.144	9.281	0.835
		丸セル+フロータブ	-2.334	0.757	7.599
7m/s	センター	無	0.046	7.583	0.434
		丸セル	0.030	10.426	0.121
		グリッド	-0.095	5.595	0.692
	サイド	無	0.076	6.644	0.315
		丸セル	0.038	9.827	0.272
		グリッド	-0.136	6.351	0.431
4m/s	センター	無	0.026	4.772	0.054
		丸セル	0.031	6.898	0.051
		グリッド	-0.034	2.262	0.157
	サイド	無	0.046	5.025	1.599
		丸セル	0.050	6.307	0.089
		グリッド	-0.061	3.555	0.101

表 3-7 液滴付着計測：クロスフローによる付着割合 [1/3]

実験条件				隣接サブチャンネルへの付着割合 (全付着量に対する) [%]
液滴放出量 [mg/min]	設定空気流速 [m/s]	サブチャンネル	スプレーサ 種類	
132mg/min	10m/s	センター	無	34.4
			丸セル	32.4
			グリッド	37.9
			グリッド+旋回羽	35.6
		サイド	無	19.9
			丸セル	6.9
	グリッド		26.8	
			丸セル+フロータブ	2.6
	7m/s	センター	無	34.6
			丸セル	32.2
			グリッド	29.0
		サイド	無	14.7
丸セル			13.1	
グリッド			10.0	
4m/s	センター	無	34.3	
		丸セル	32.4	
		グリッド	30.0	
	サイド	無	14.1	
		丸セル	13.6	
		グリッド	8.0	

表 3-7 液滴付着計測：クロスフローによる付着割合 [2/3]

実験条件				隣接サブチャンネルへの付着割合 (全付着量に対する) [%]	
液滴放出量 [mg/min]	設定空気流速 [m/s]	サブチャンネル	スプレーサ 種類		
144mg/min	10m/s	センター	無	39.9	
			丸セル	35.5	
			グリッド	34.0	
	7m/s	センター	センター	無	24.8
				丸セル	18.1
				グリッド	22.1
		サイド	無	32.5	
			丸セル	33.8	
			グリッド	29.6	
4m/s	センター	センター	無	18.7	
			丸セル	16.3	
			グリッド	17.0	
	サイド	センター	センター	無	28.2
				丸セル	33.9
				グリッド	33.0
		サイド	無	16.3	
			丸セル	14.7	
			グリッド	13.3	

表 3-7 液滴付着計測：クロスフローによる付着割合 [3/3]

実験条件				隣接サブチャンネルへの付着割合 (全付着量に対する) [%]	
液滴放出量 [mg/min]	設定空気流速 [m/s]	サブチャンネル	スぺーサ 種類		
163mg/min	10m/s	センター	無	42.4	
			丸セル	39.0	
			グリッド	29.5	
	7m/s	センター	サイド	無	32.3
				丸セル	18.5
				グリッド	22.0
	4m/s	7m/s	センター	無	34.2
				丸セル	38.7
				グリッド	30.6
4m/s		センター	サイド	無	37.6
				丸セル	24.3
				グリッド	20.7
4m/s	4m/s	センター	無	37.4	
			丸セル	41.8	
			グリッド	35.3	
	4m/s	センター	サイド	無	21.8
				丸セル	20.7
				グリッド	16.4

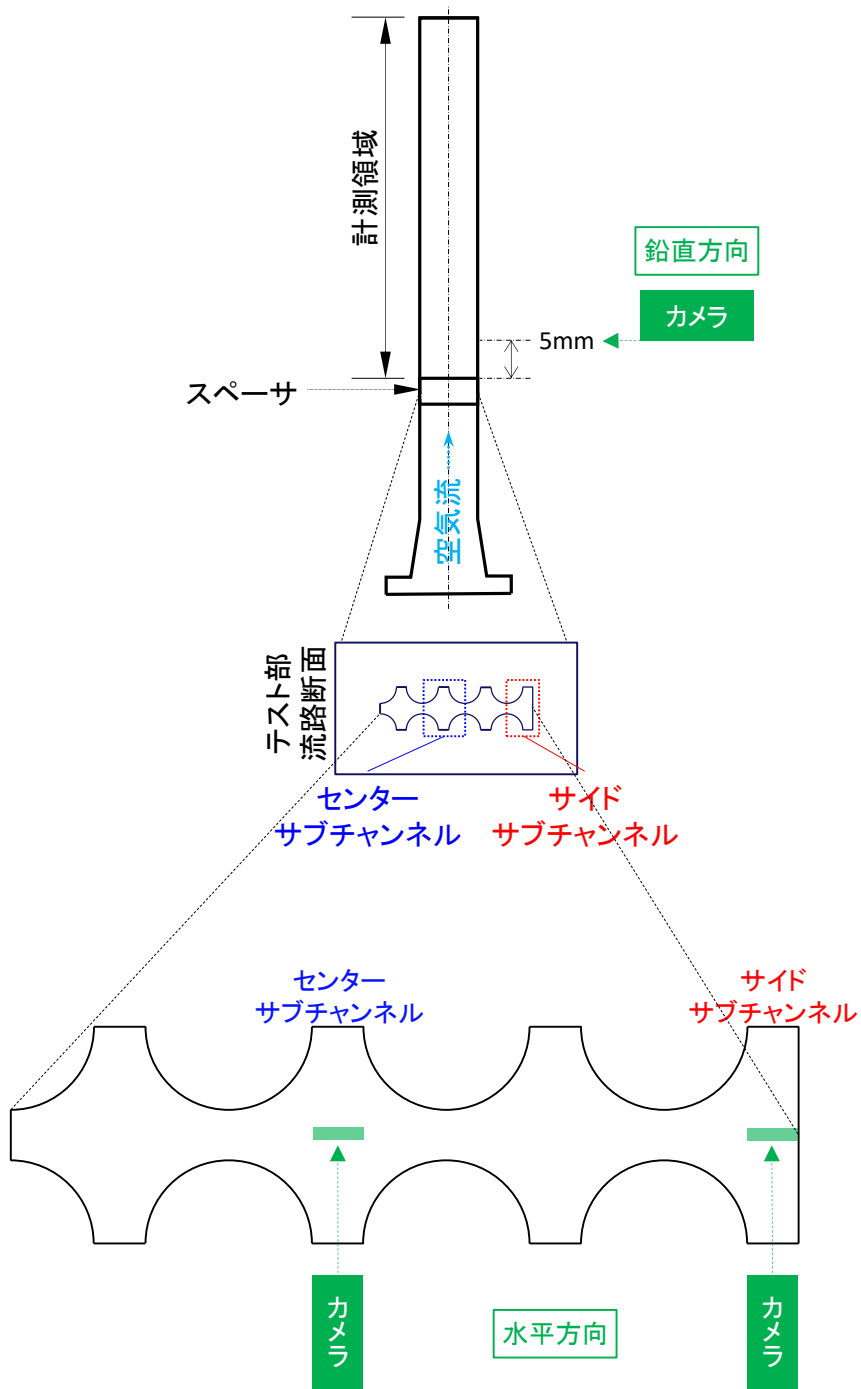


図 3-1 空気流計測方法

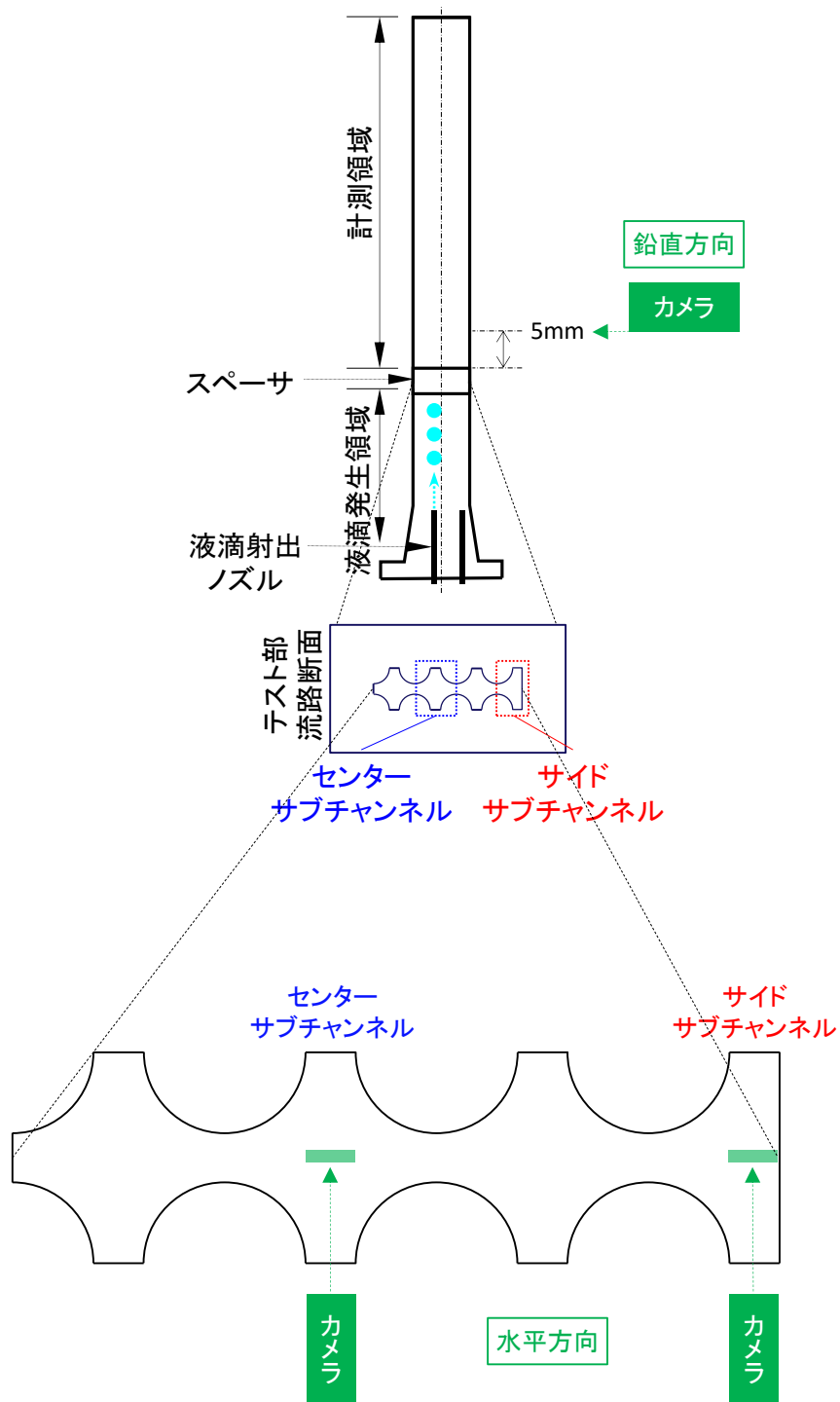


図 3-2 スペーサ通過後の液滴運動の計測方法

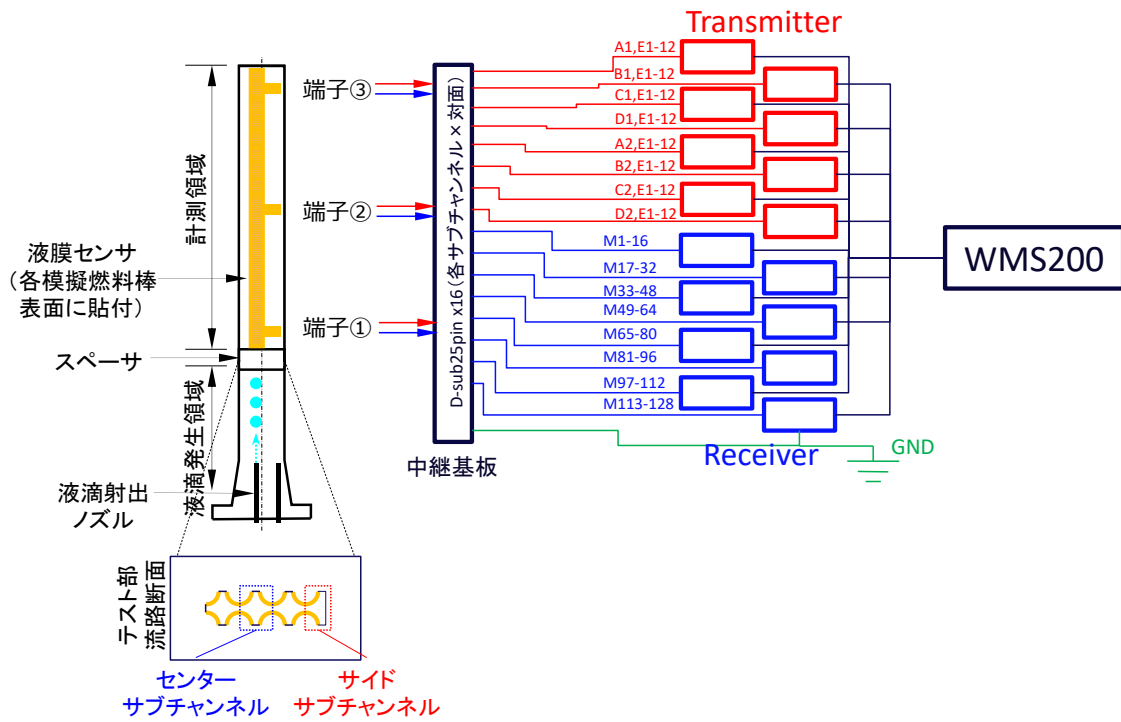


図 3-3 スペーサ通過後の燃料棒表面への液滴付着の計測方法

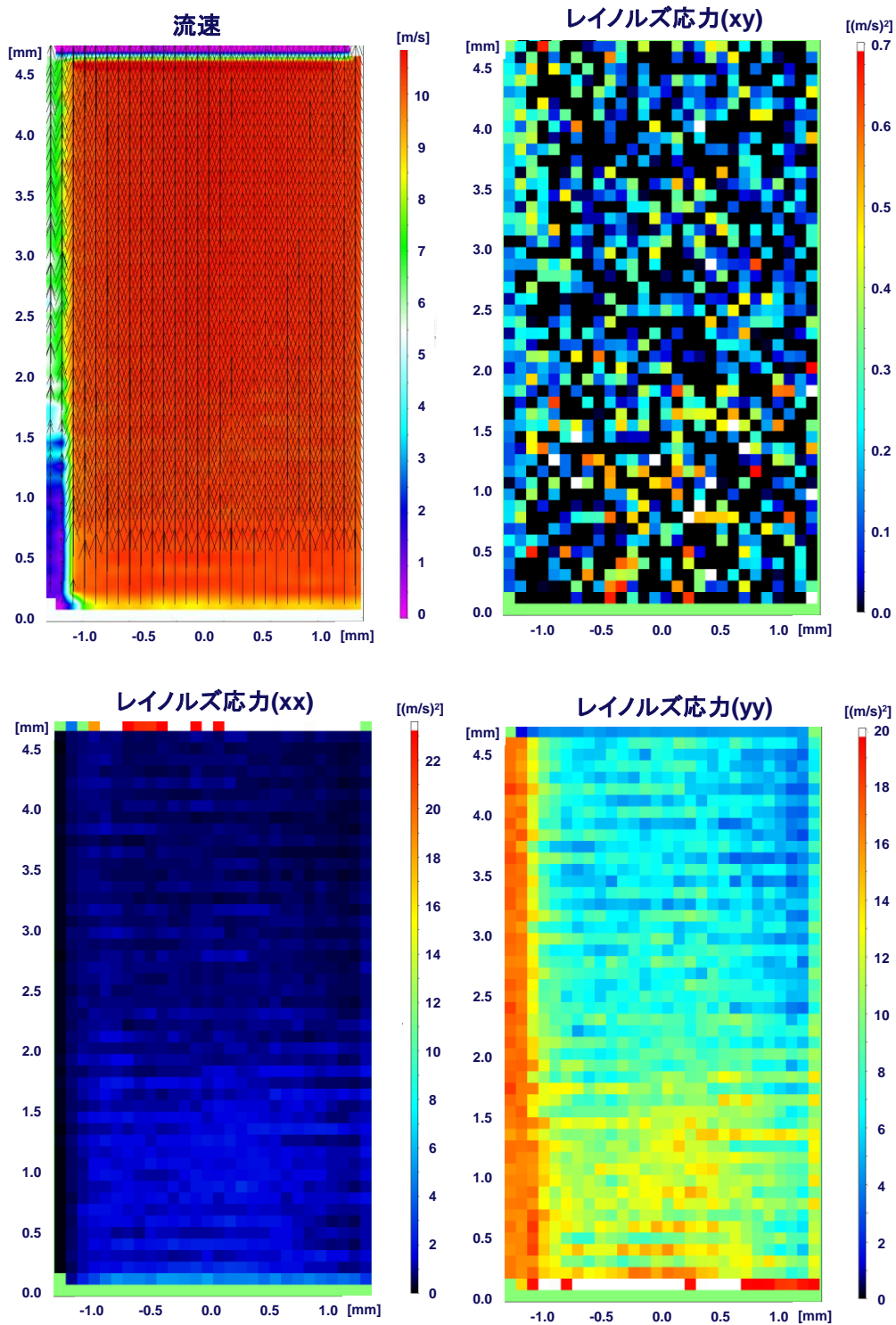


図 3-4 空気流計測：速度ベクトル及び乱流統計量の空間分布
 (1/20：空気流速平均値 10m/s、センター体系、スペーサ無)

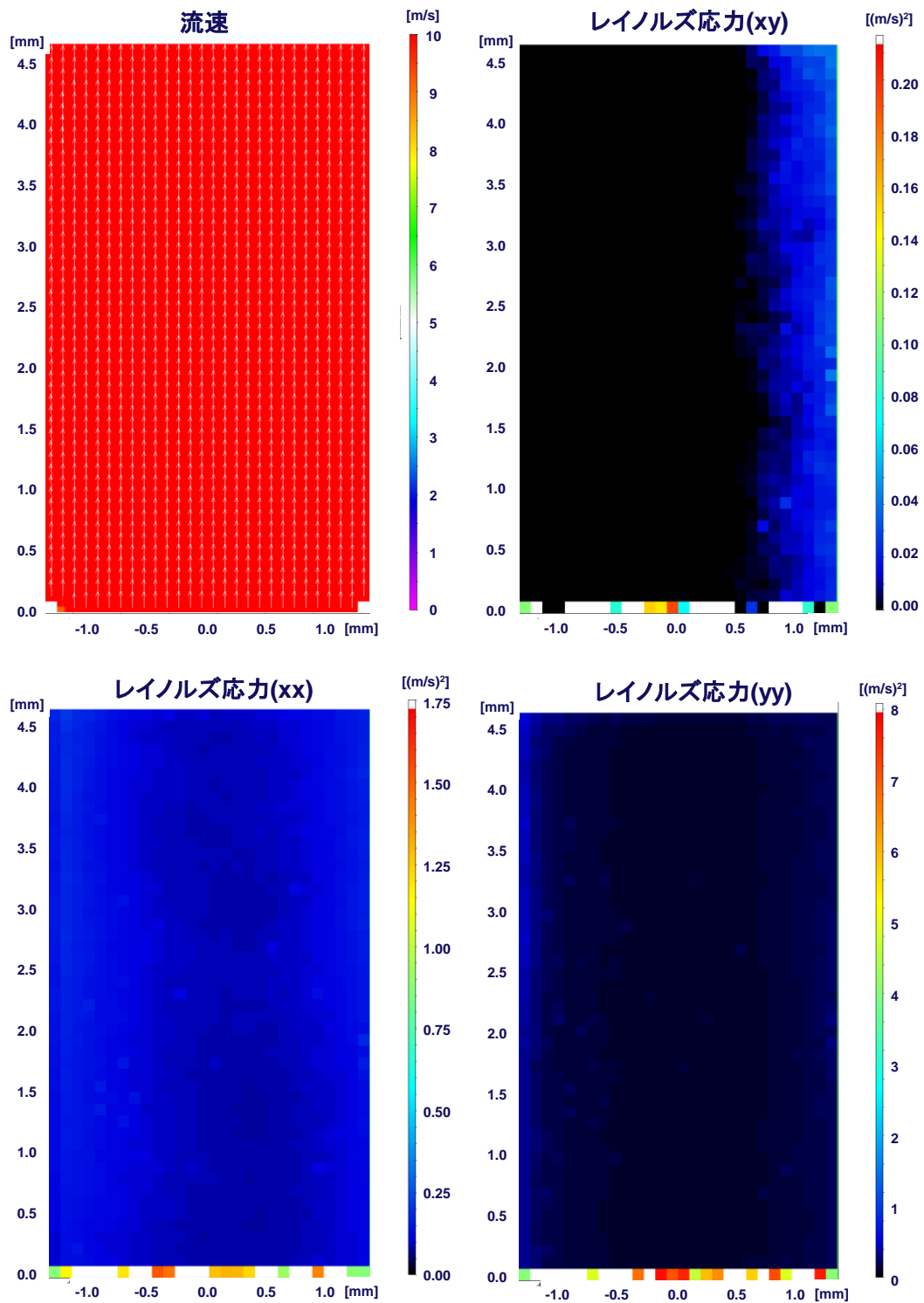


図 3-4 空気流計測：速度ベクトル及び乱流統計量の空間分布
(2/20：空気流速平均値 10m/s、センター体系、丸セル型)

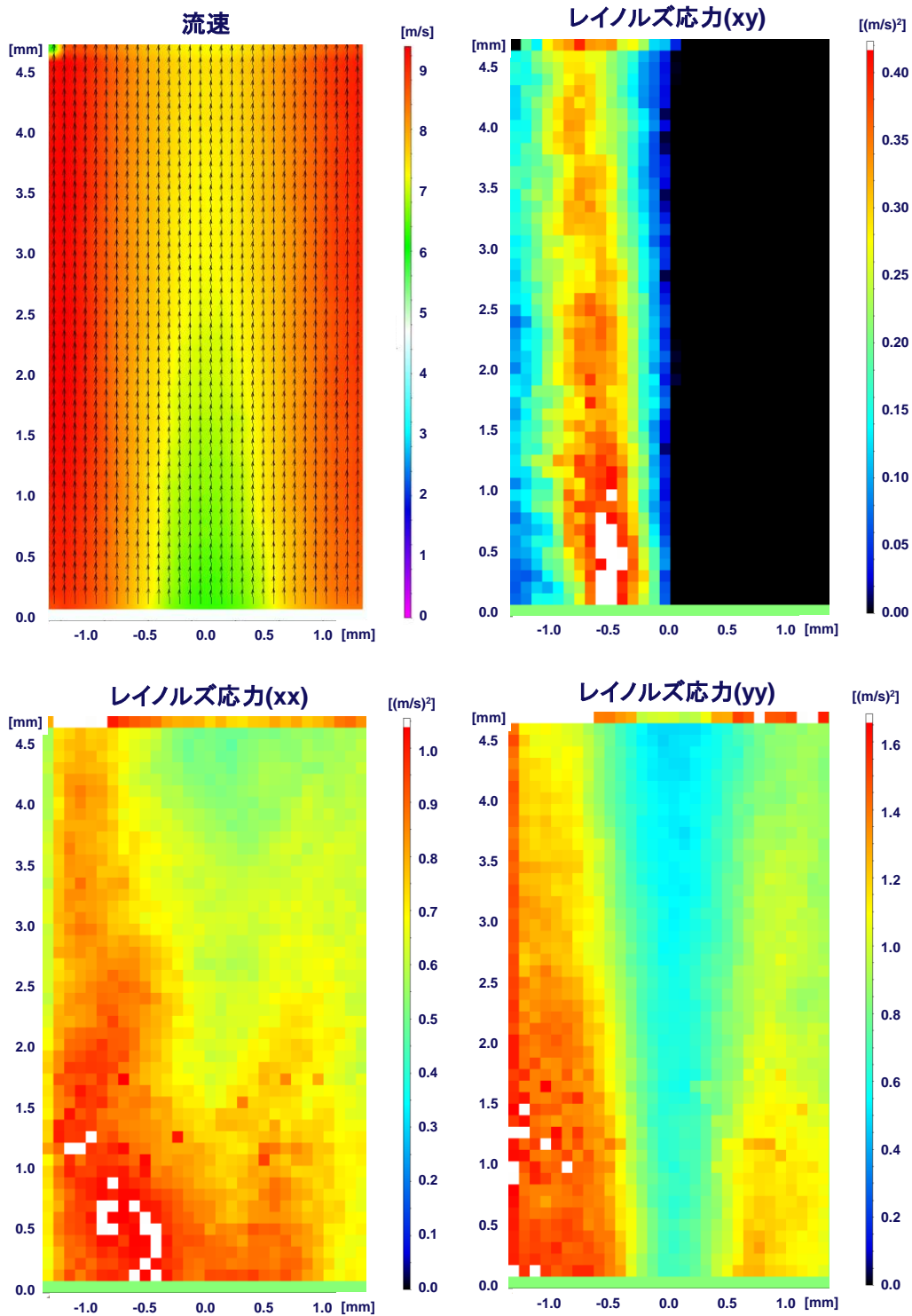


図 3-4 空気流計測：速度ベクトル及び乱流統計量の空間分布
 (3/20：空気流速平均値 10m/s、センター体系、グリッド型)

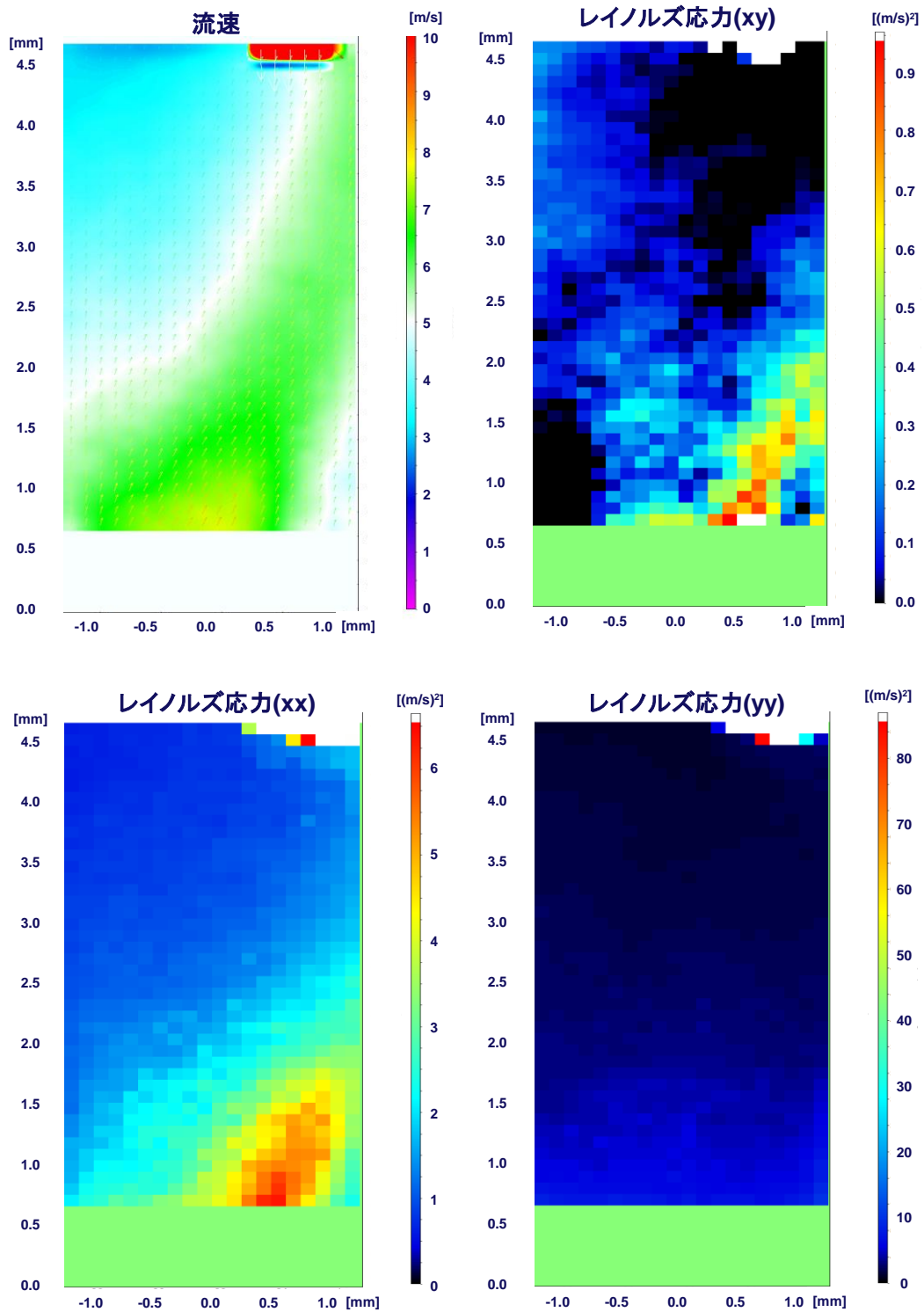


図 3-4 空気流計測：速度ベクトル及び乱流統計量の空間分布
 (4/20：空気流速平均値 10m/s、センター体系、グリッド型+旋回羽)

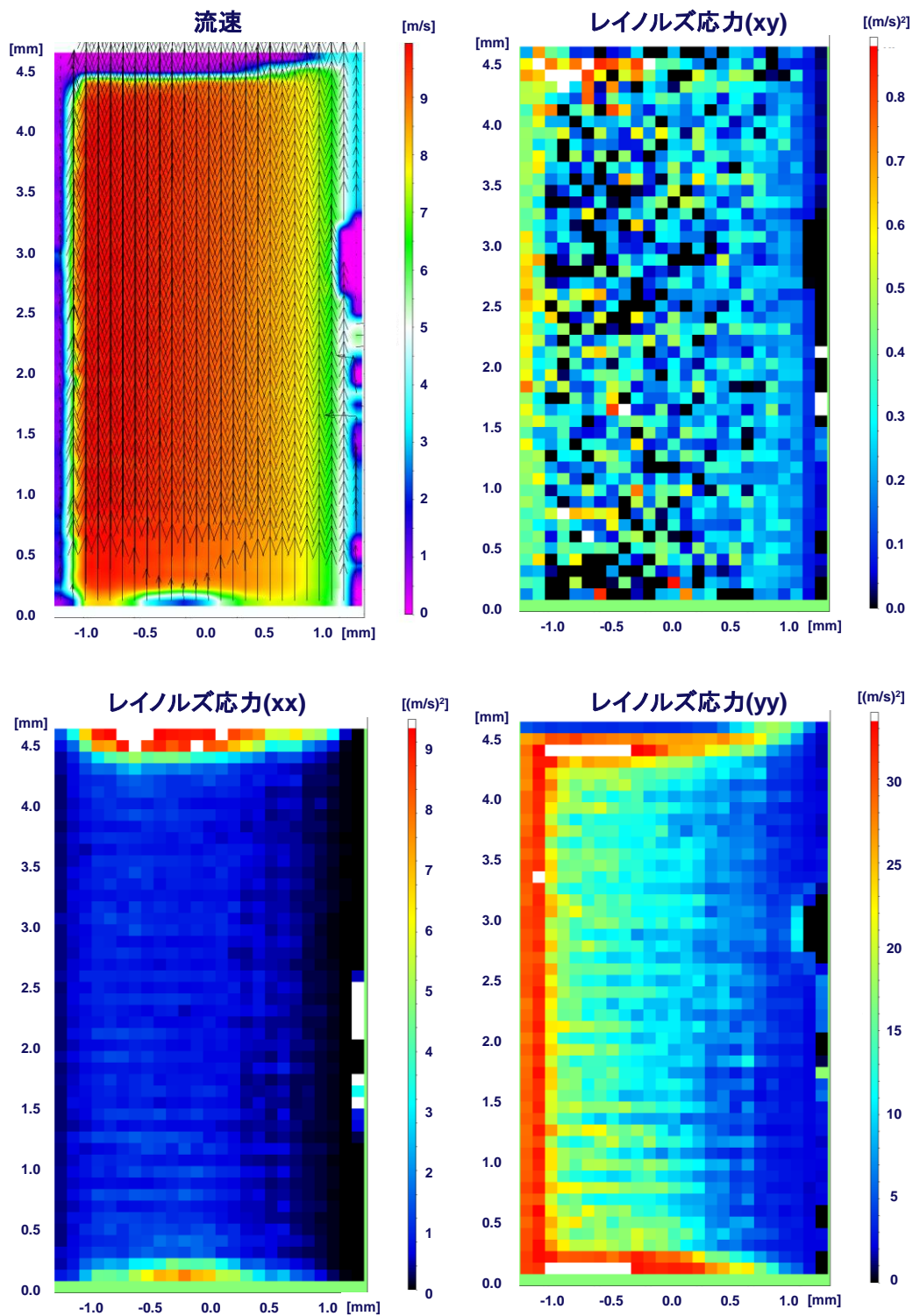


図 3-4 空気流計測：速度ベクトル及び乱流統計量の空間分布
 (5/20：空気流速平均値 10m/s、サイド体系、スパーサ無)

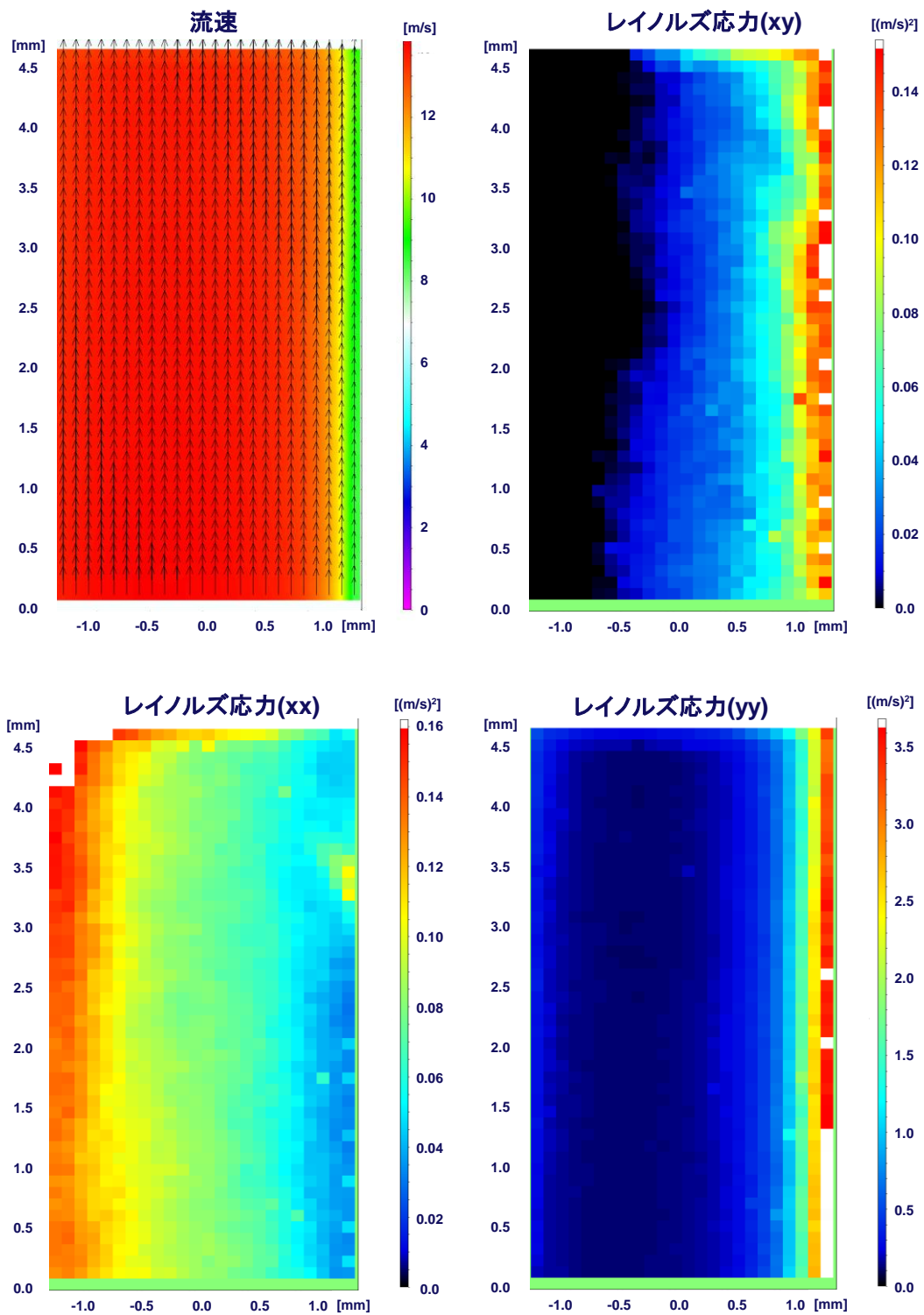


図 3-4 空気流計測：速度ベクトル及び乱流統計量の空間分布
 (6/20：空気流速平均値 10m/s、サイド体系、丸セル型)

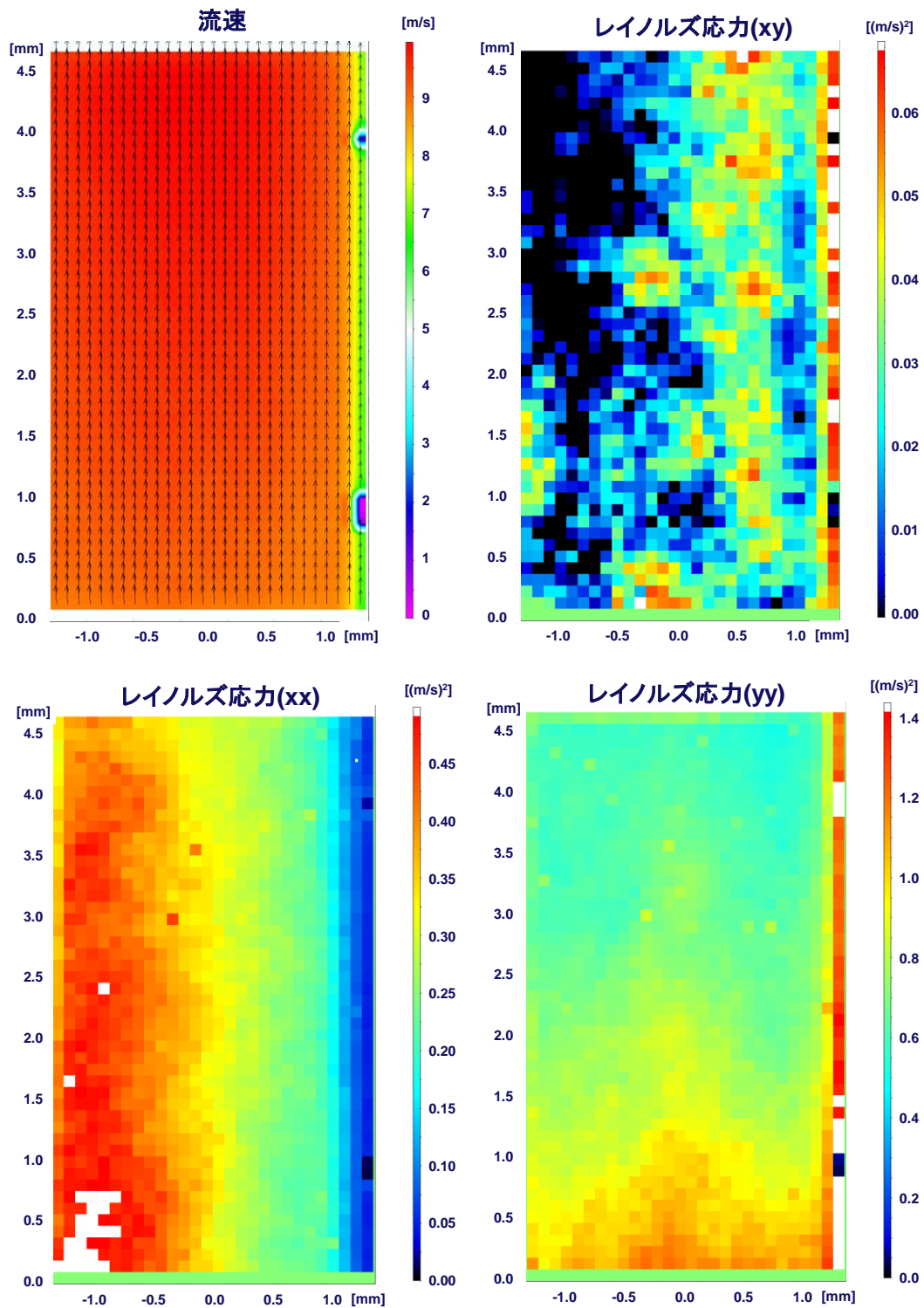


図 3-4 空気流計測：速度ベクトル及び乱流統計量の空間分布
(7/20：空気流速平均値 10m/s、サイド体系、グリッド型)

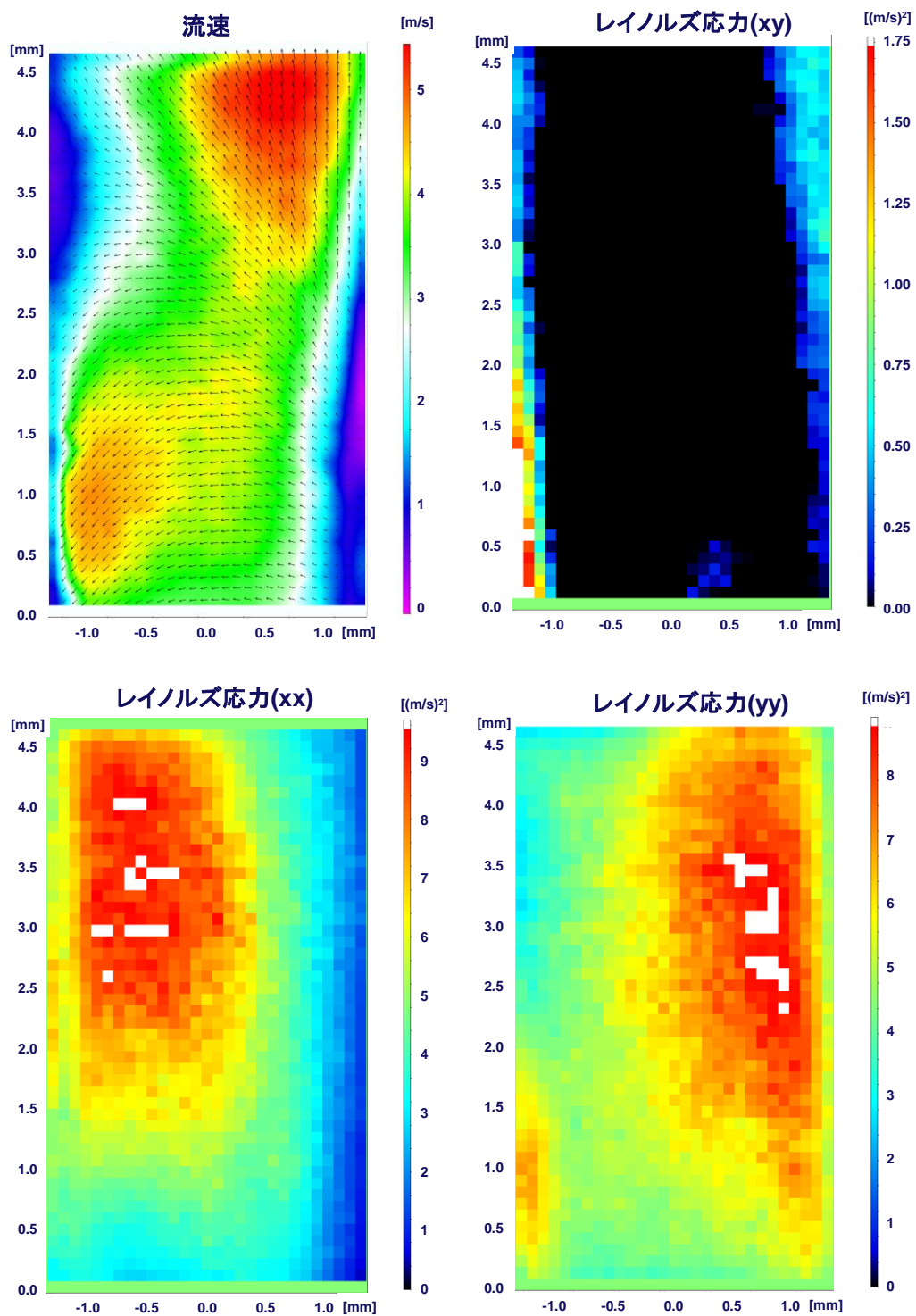


図 3-4 空気流計測：速度ベクトル及び乱流統計量の空間分布
 (8/20：空気流速平均値 10m/s、サイド体系、丸セル型＋フロータブ)

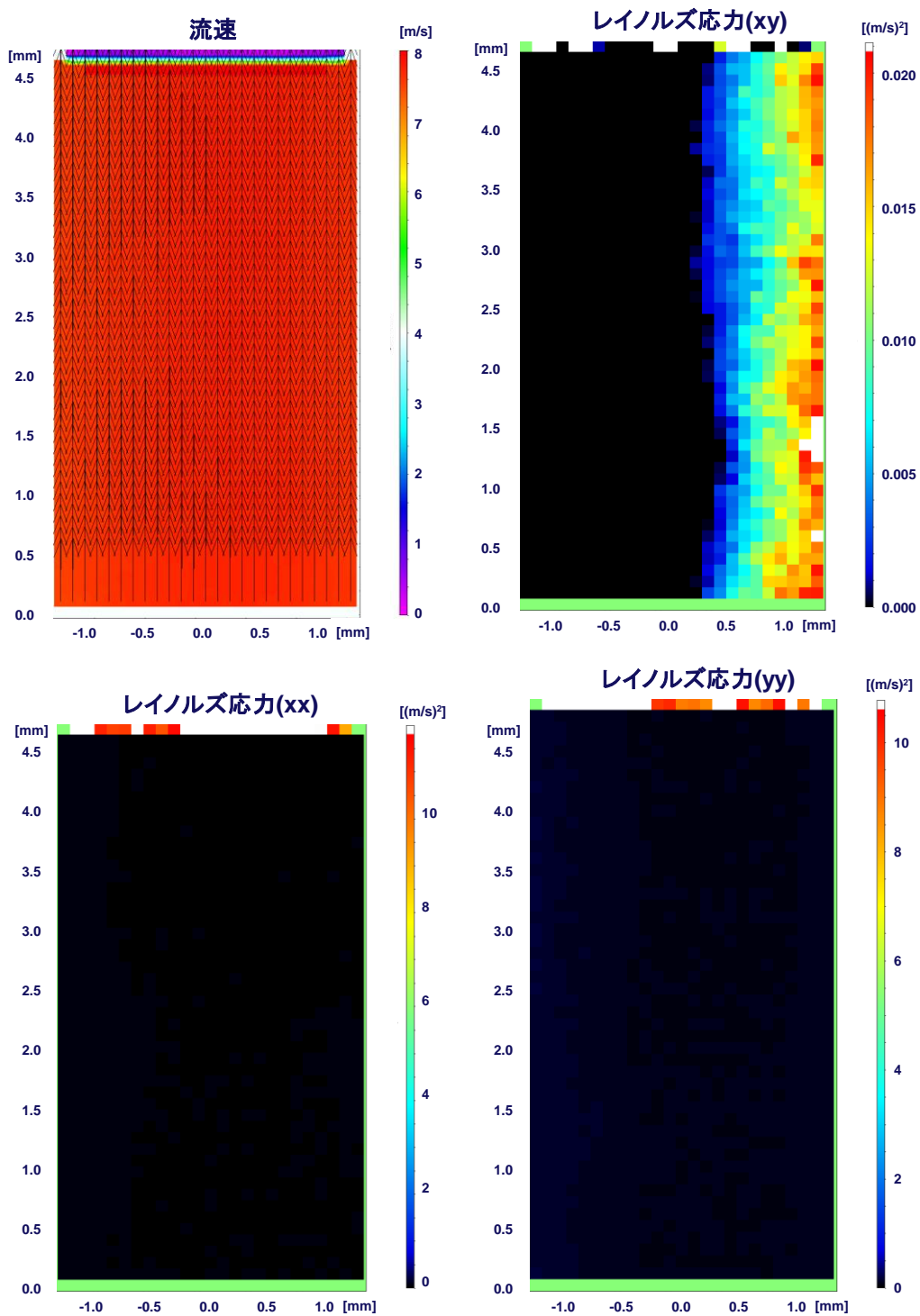


図 3-4 空気流計測：速度ベクトル及び乱流統計量の空間分布
(9/20：空気流速平均値 7m/s、センター体系、スパーサ無)

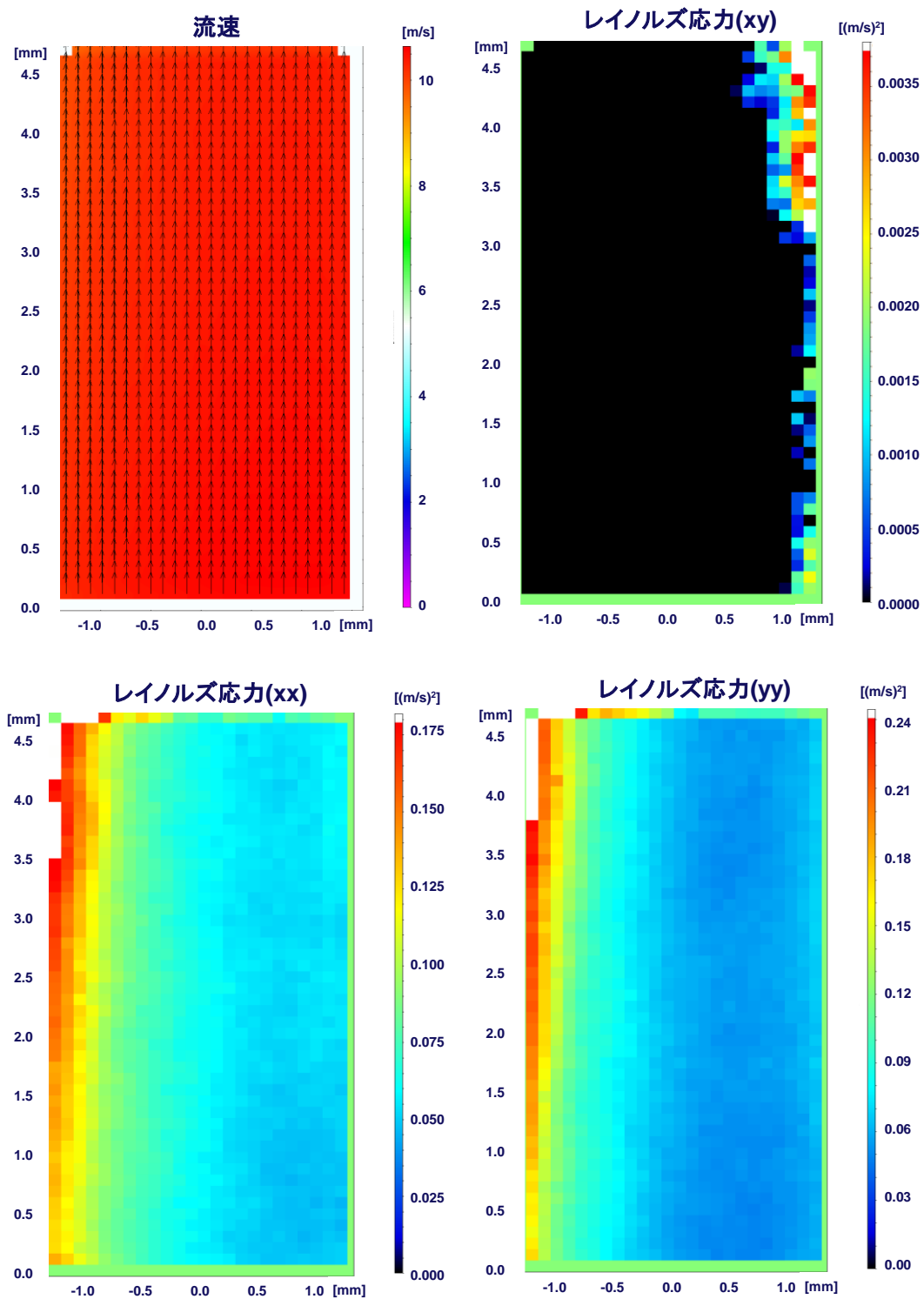


図 3-4 空気流計測：速度ベクトル及び乱流統計量の空間分布
(10/20：空気流速平均値 7m/s、センター体系、丸セル型)

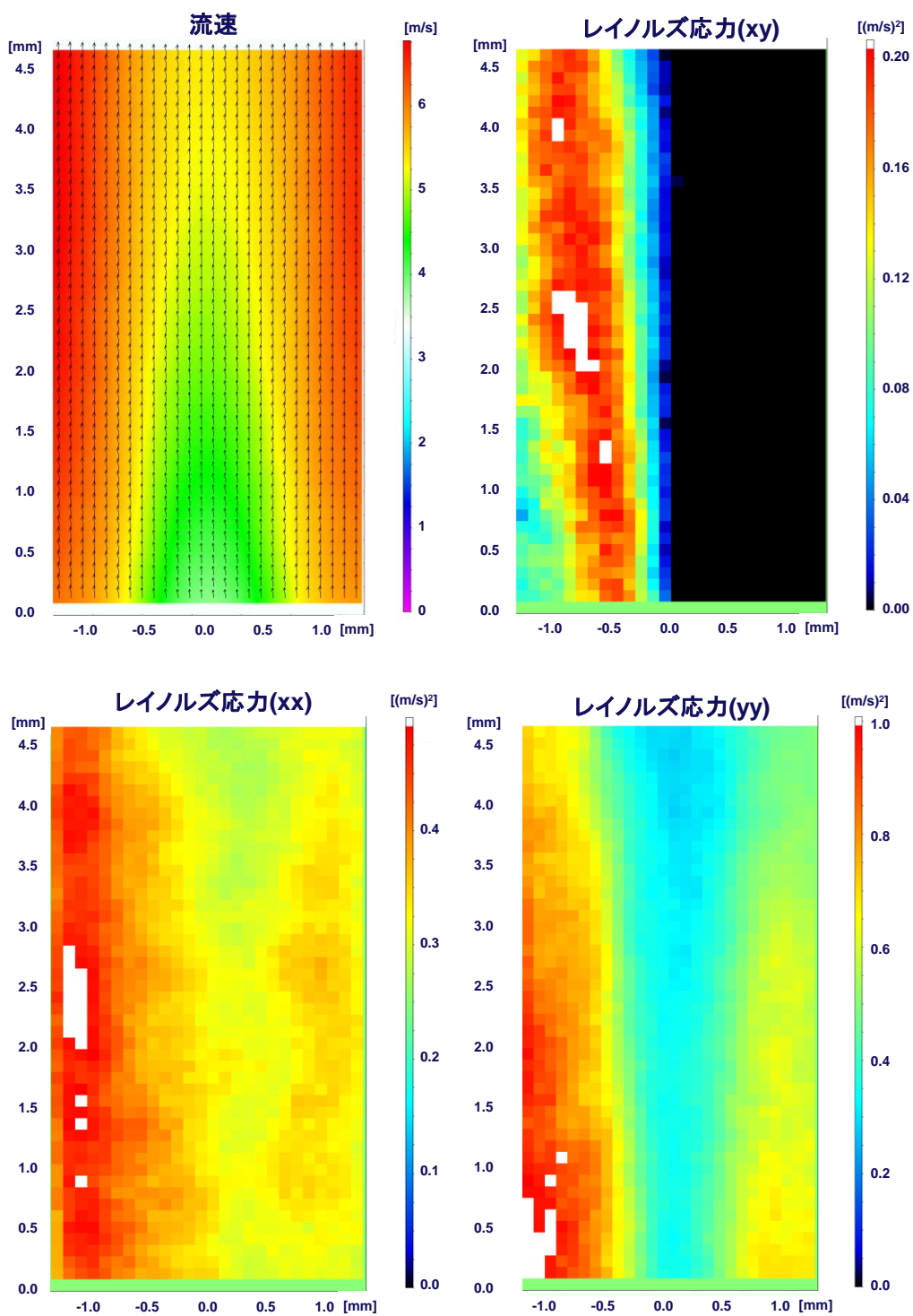


図 3-4 空気流計測：速度ベクトル及び乱流統計量の空間分布
 (11/20：空気流速平均値 7m/s、センター体系、グリッド型)

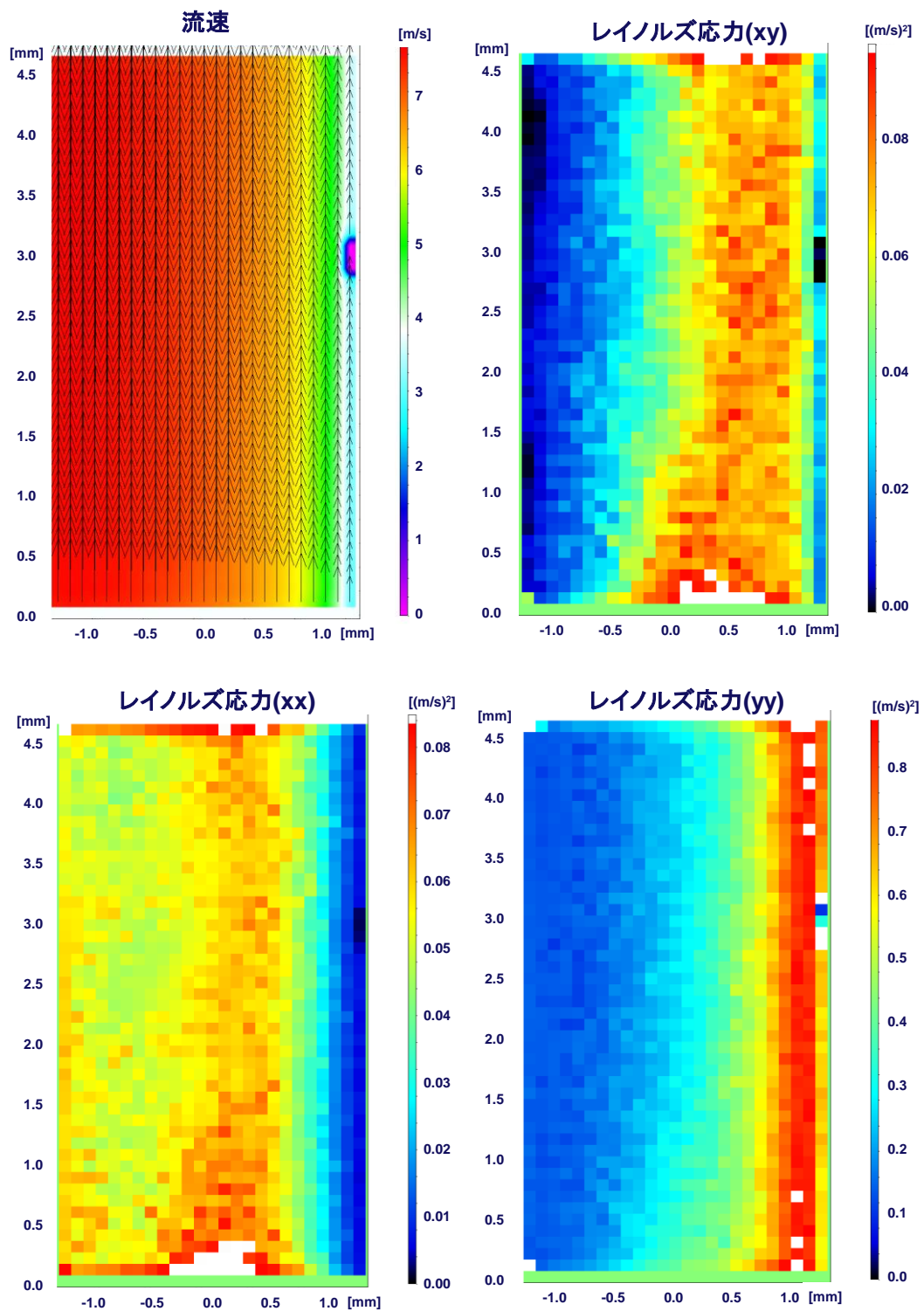


図 3-4 空気流計測：速度ベクトル及び乱流統計量の空間分布
(12/20：空気流速平均値 7m/s、サイド体系、スパーサ無)

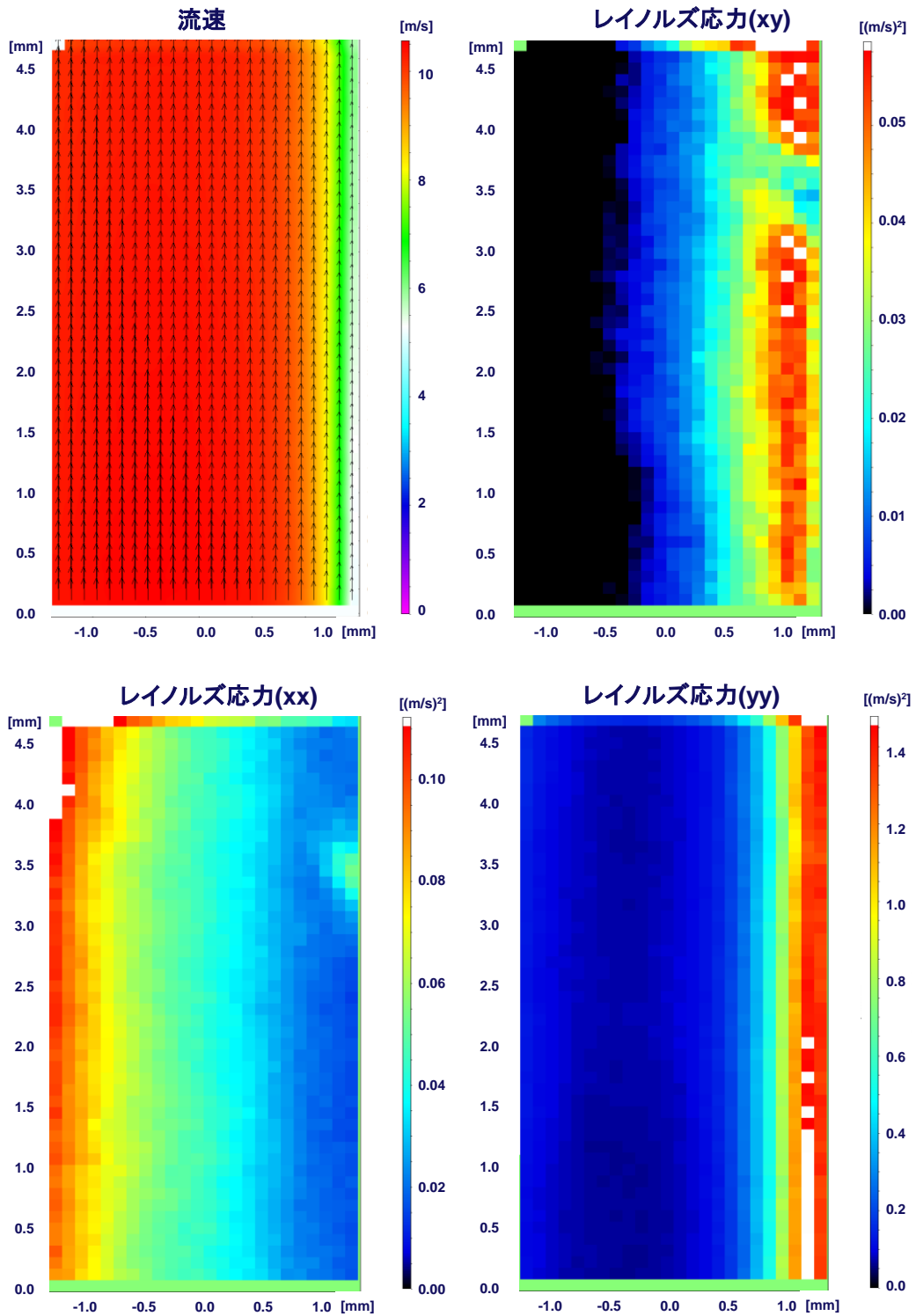


図 3-4 空気流計測：速度ベクトル及び乱流統計量の空間分布
 (13/20：空気流速平均値 7m/s、サイド体系、丸セル型)

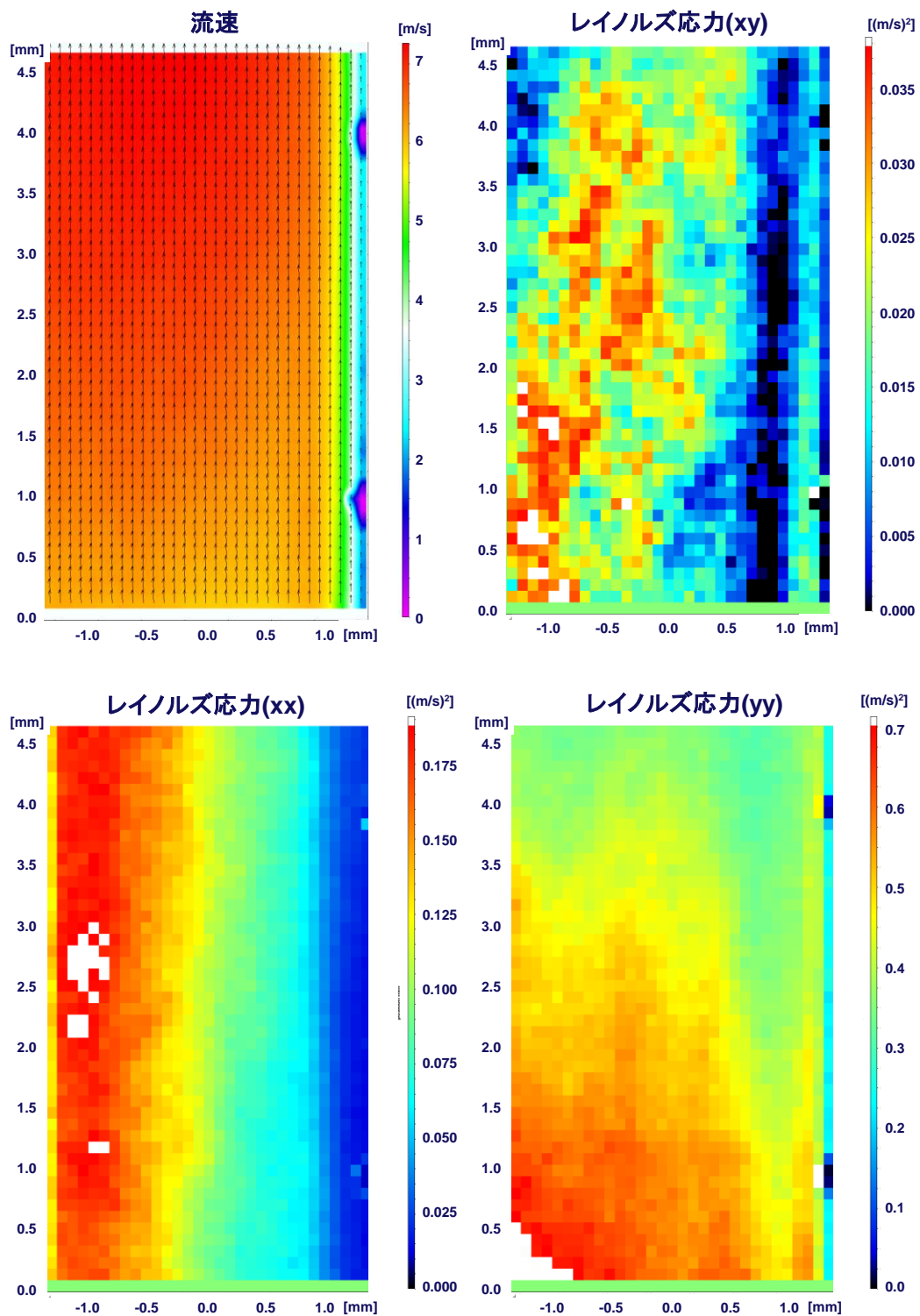


図 3-4 空気流計測：速度ベクトル及び乱流統計量の空間分布
 (14/20：空気流速平均値 7m/s、サイド体系、グリッド型)

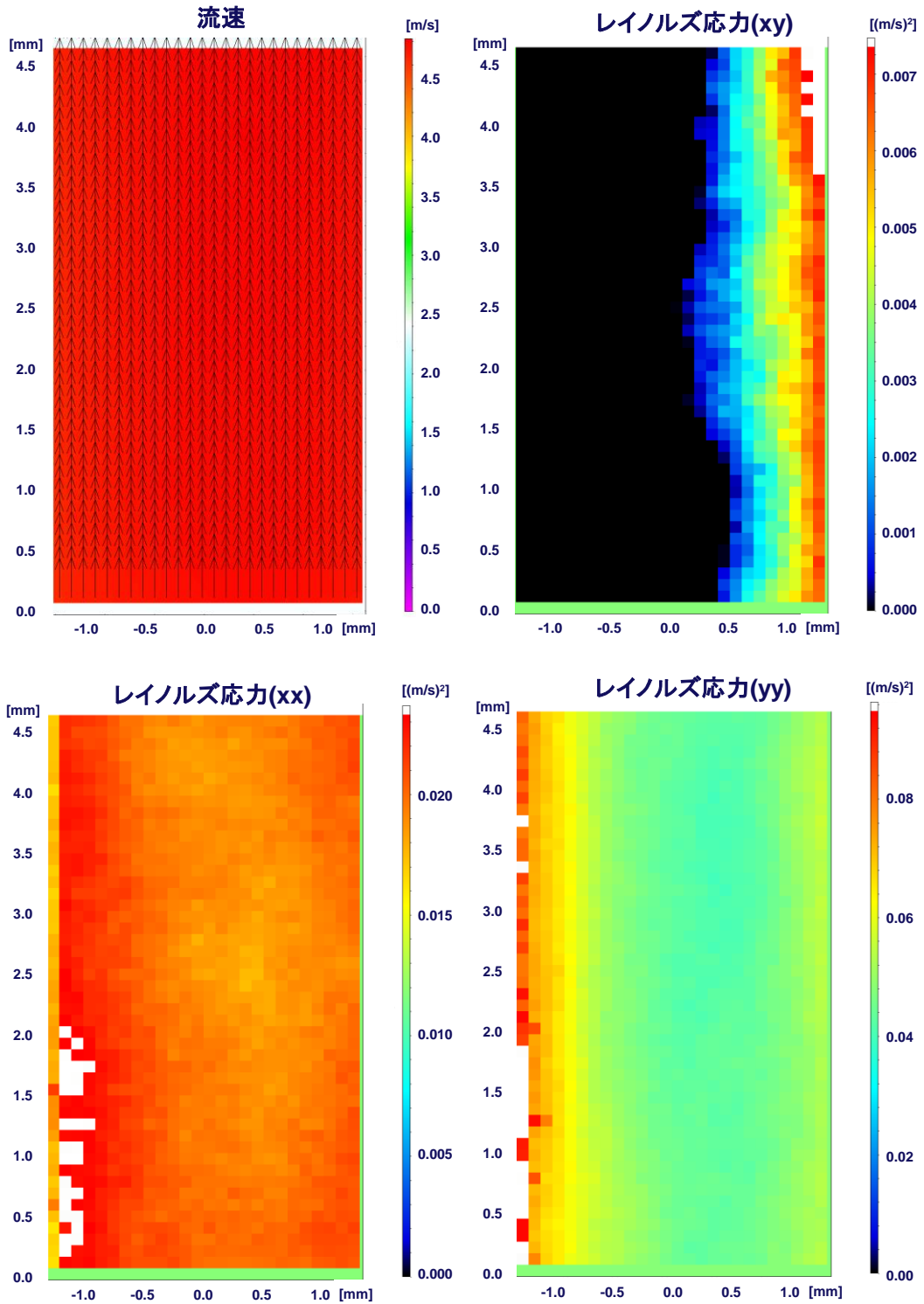


図 3-4 空気流計測：速度ベクトル及び乱流統計量の空間分布
 (15/20：空気流速平均値 4m/s、センター体系、スペーサ無)

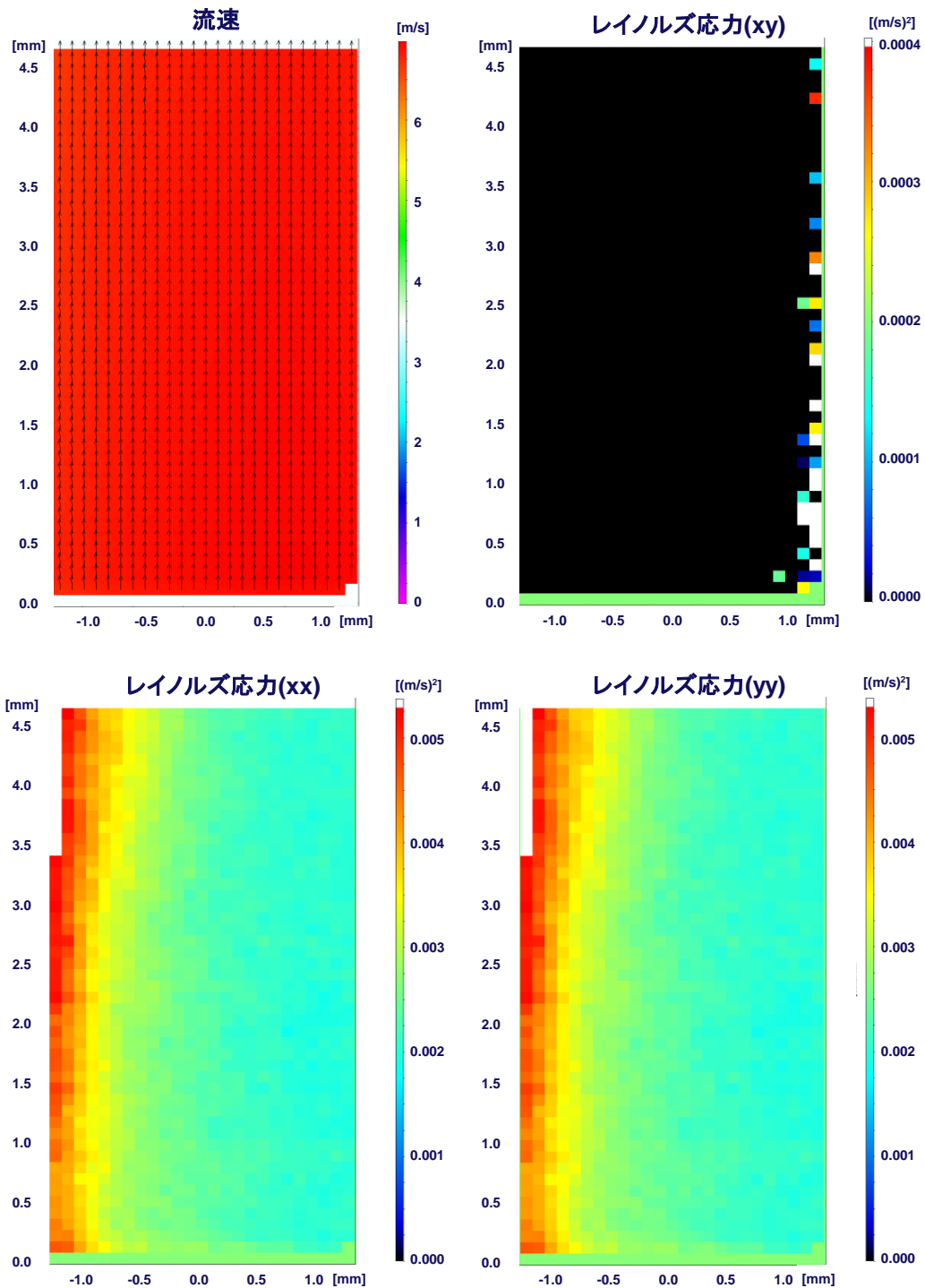


図 3-4 空気流計測：速度ベクトル及び乱流統計量の空間分布
 (16/20：空気流速平均値 4m/s、センター体系、丸セル型)

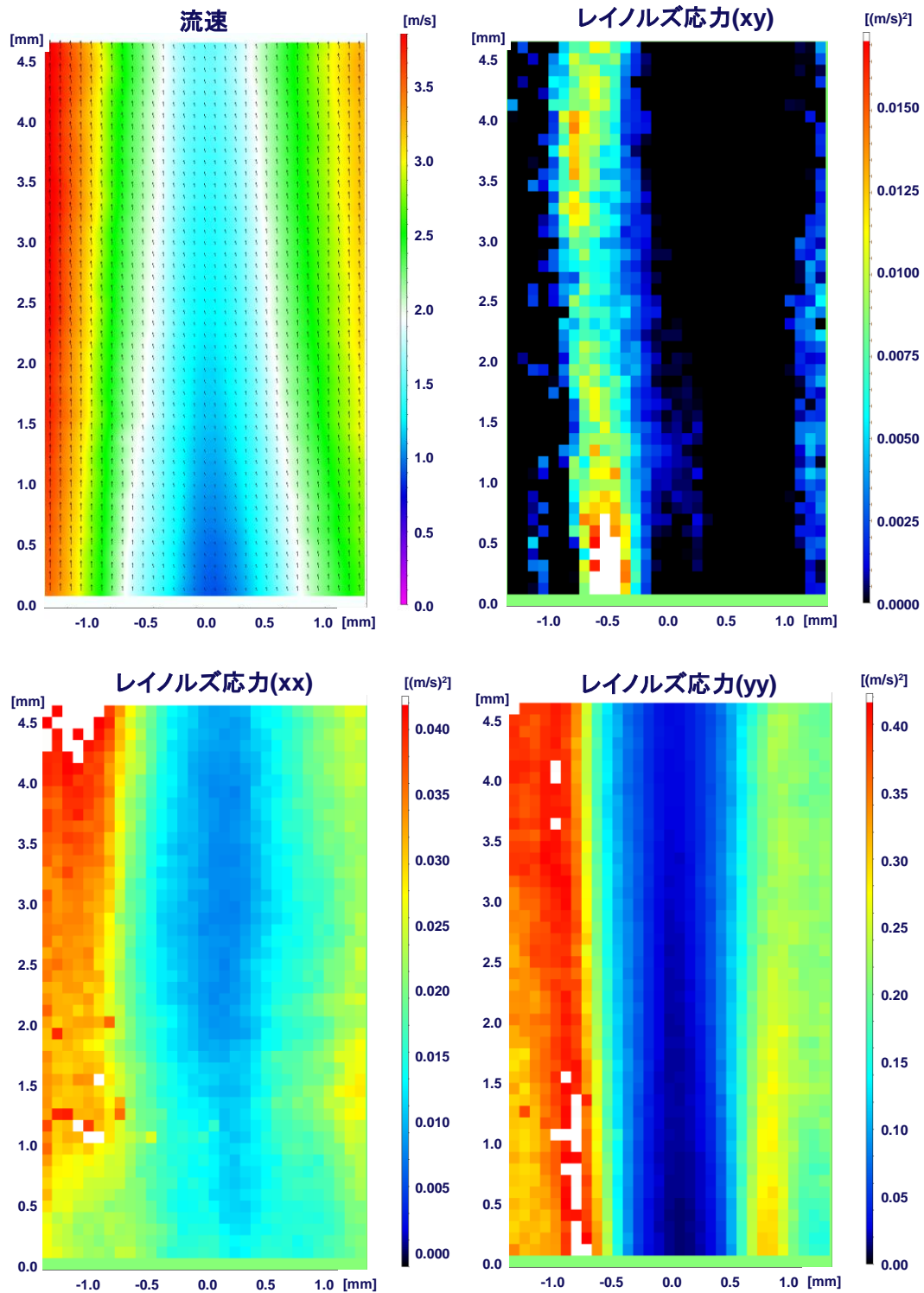


図 3-4 空気流計測：速度ベクトル及び乱流統計量の空間分布
 (17/20：空気流速平均値 4m/s、センター体系、グリッド型)

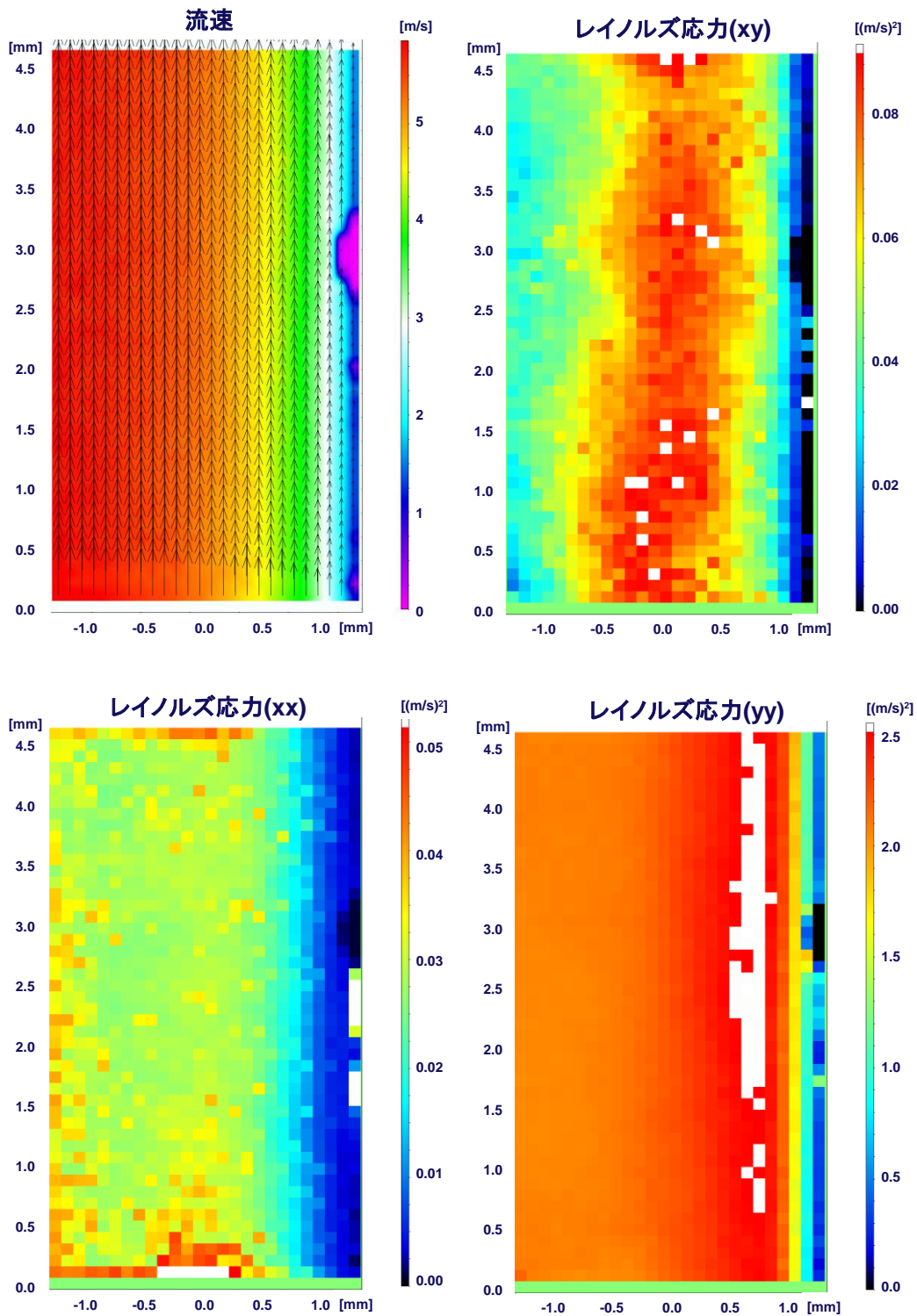


図 3-4 空気流計測：速度ベクトル及び乱流統計量の空間分布
(18/20：空気流速平均値 4m/s、サイド体系、スパーサ無)

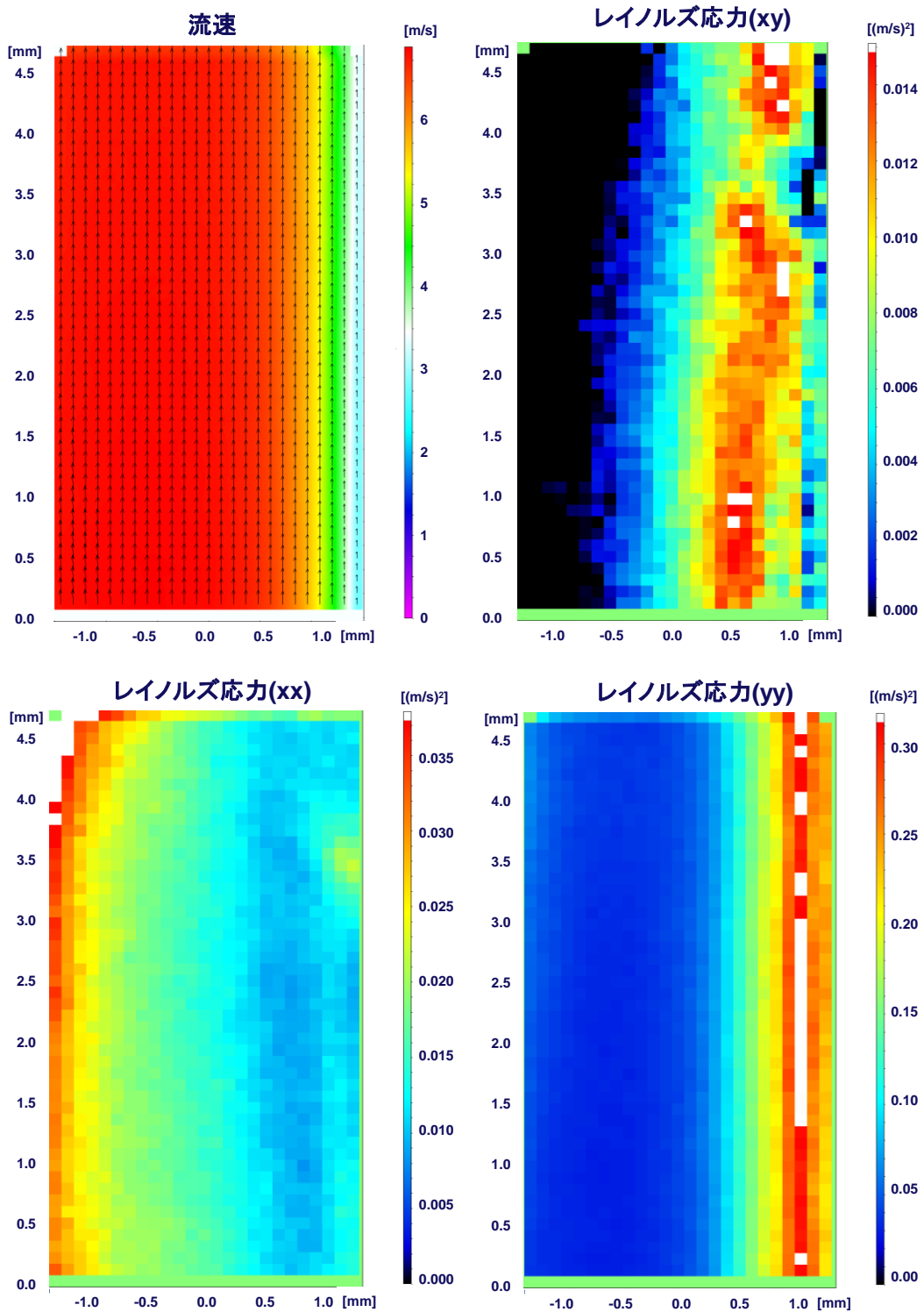


図 3-4 空気流計測：速度ベクトル及び乱流統計量の空間分布
 (19/20：空気流速平均値 4m/s、サイド体系、丸セル型)

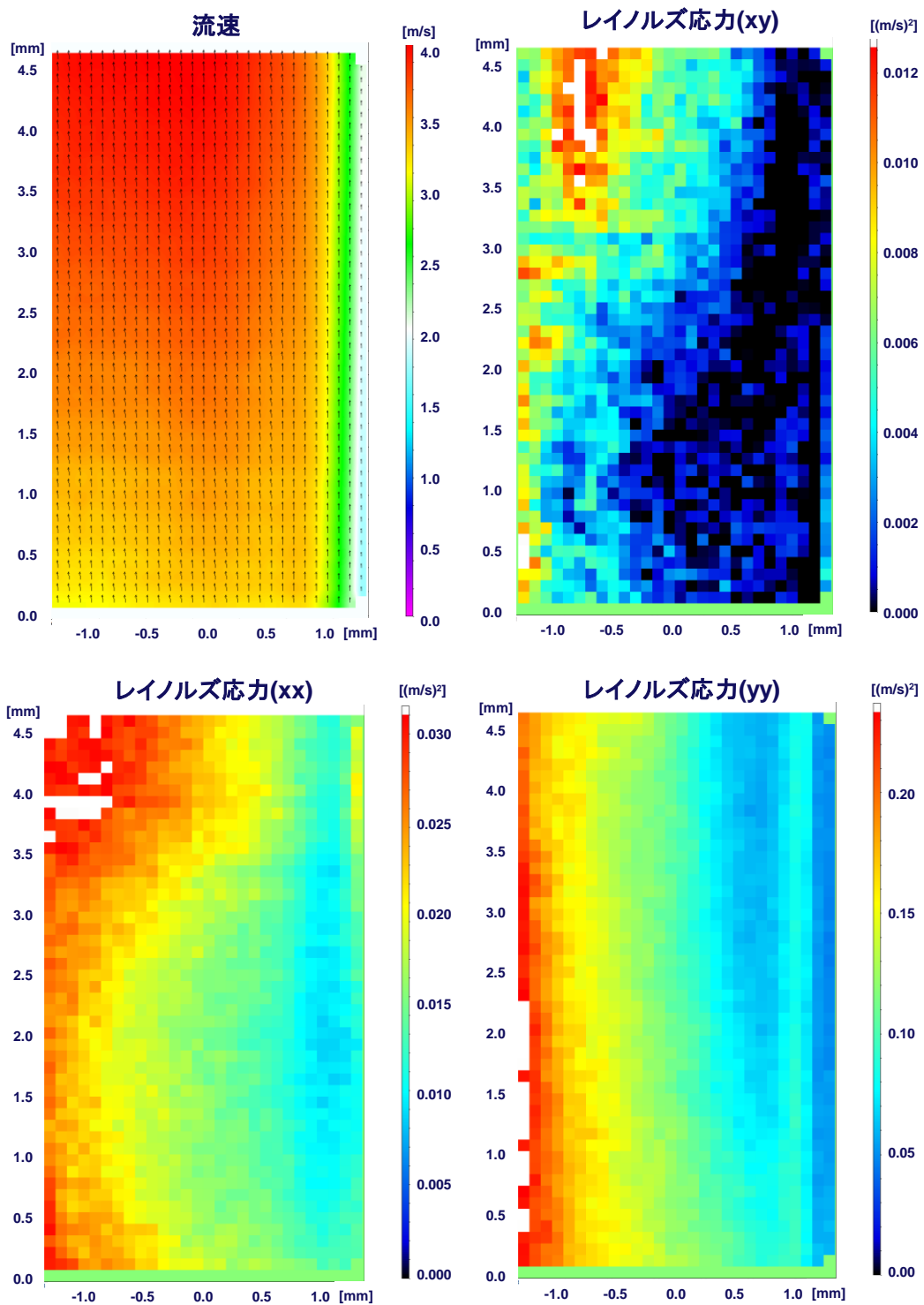


図 3-4 空気流計測：速度ベクトル及び乱流統計量の空間分布
(20/20：空気流速平均値 4m/s、サイド体系、グリッド型)

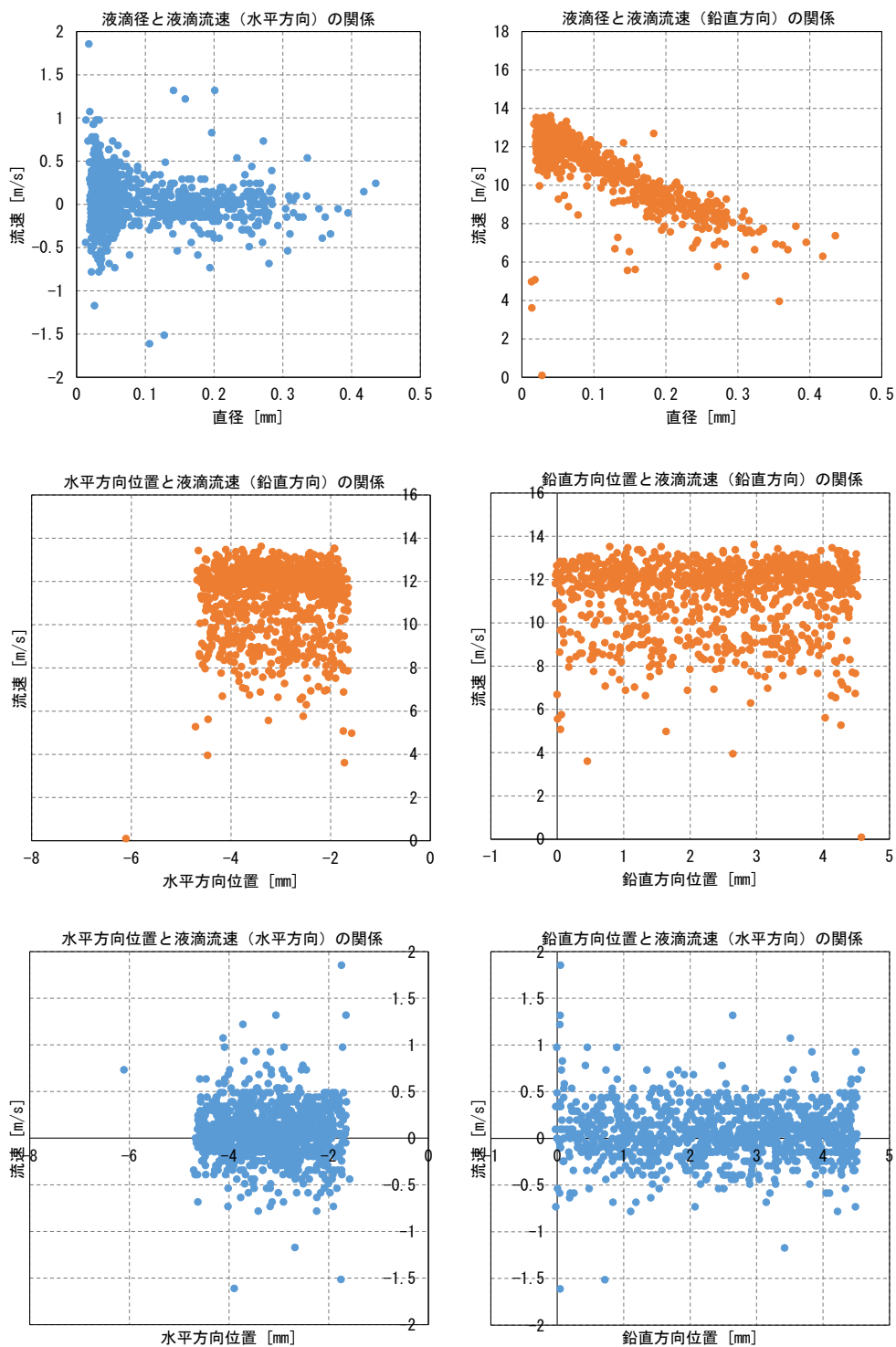


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (1/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 10m/s、センター体系、スぺーサ無)

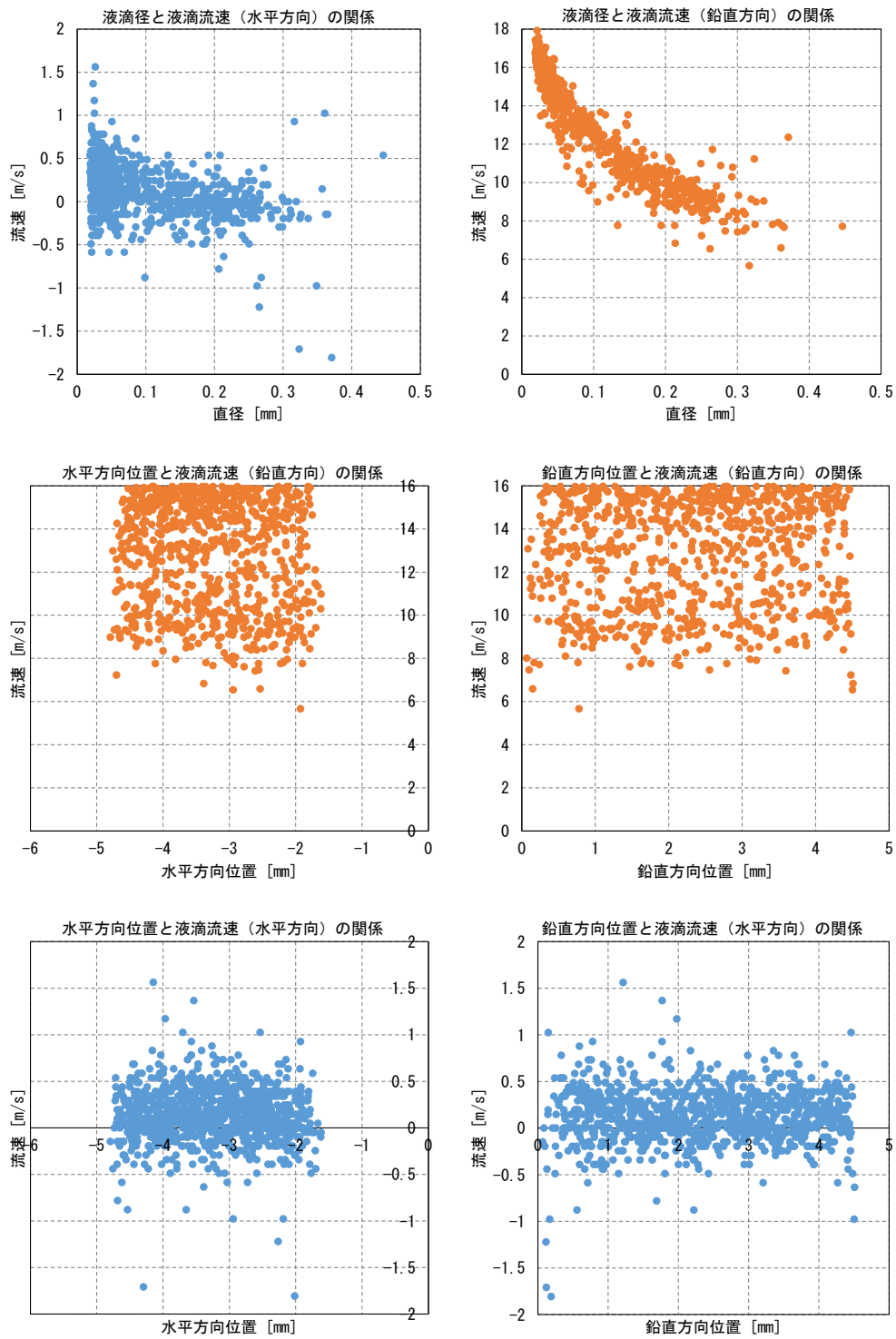


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (2/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 10m/s、センター体系、丸セル型)

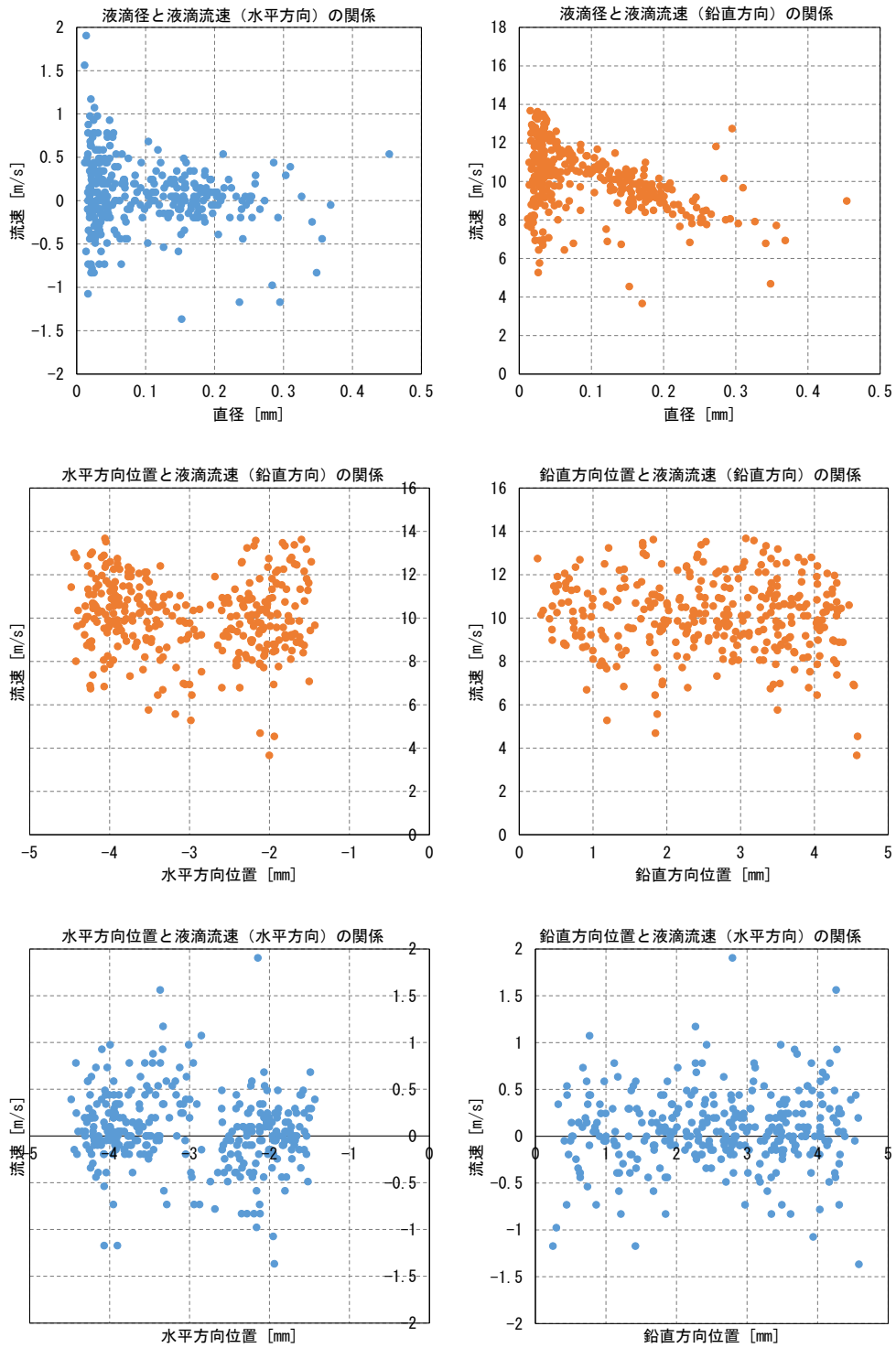


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (3/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 10m/s、センター体系、グリッド型)

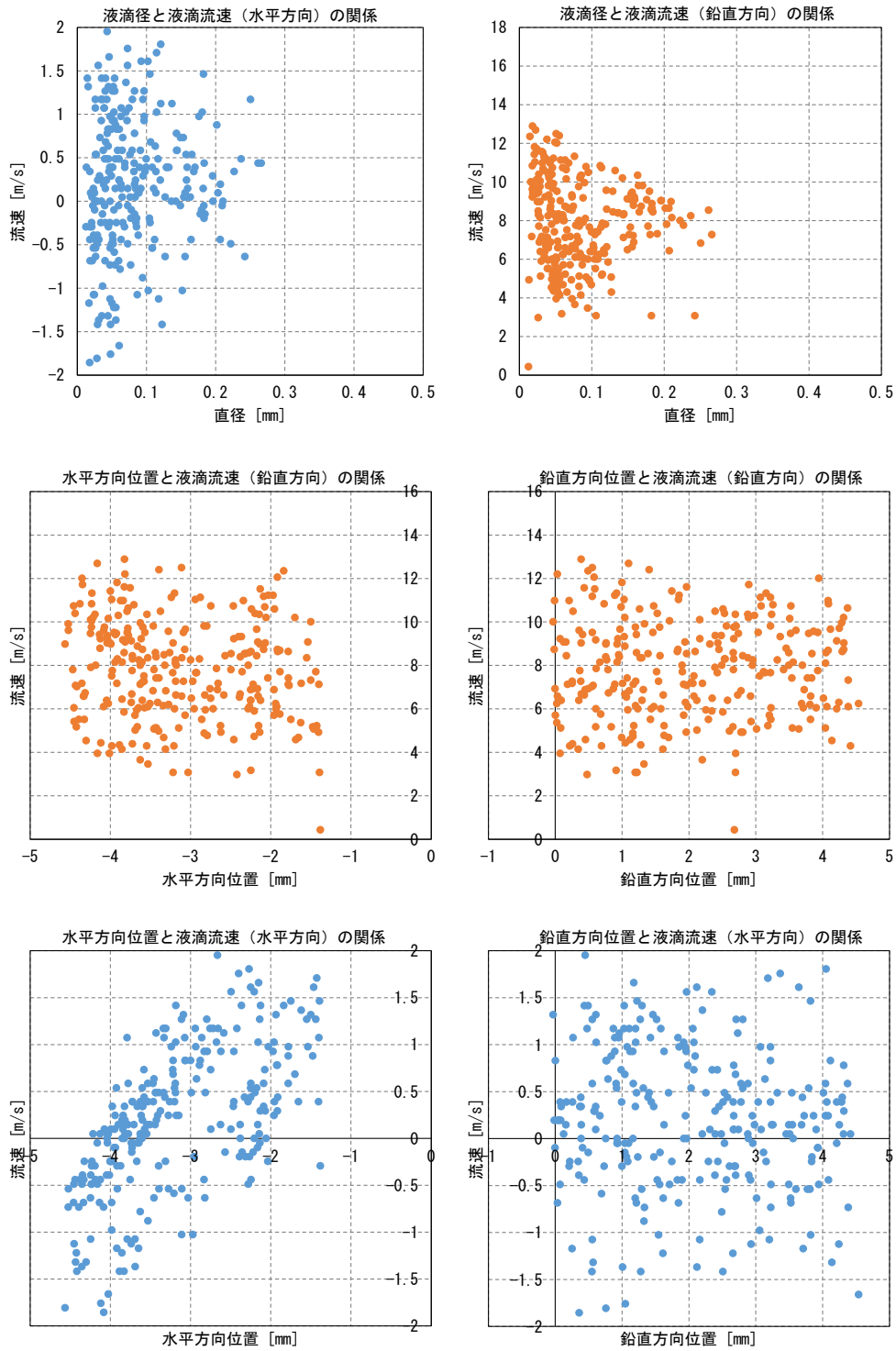


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (4/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 10m/s、センター体系、グリッド型+旋
 回羽)

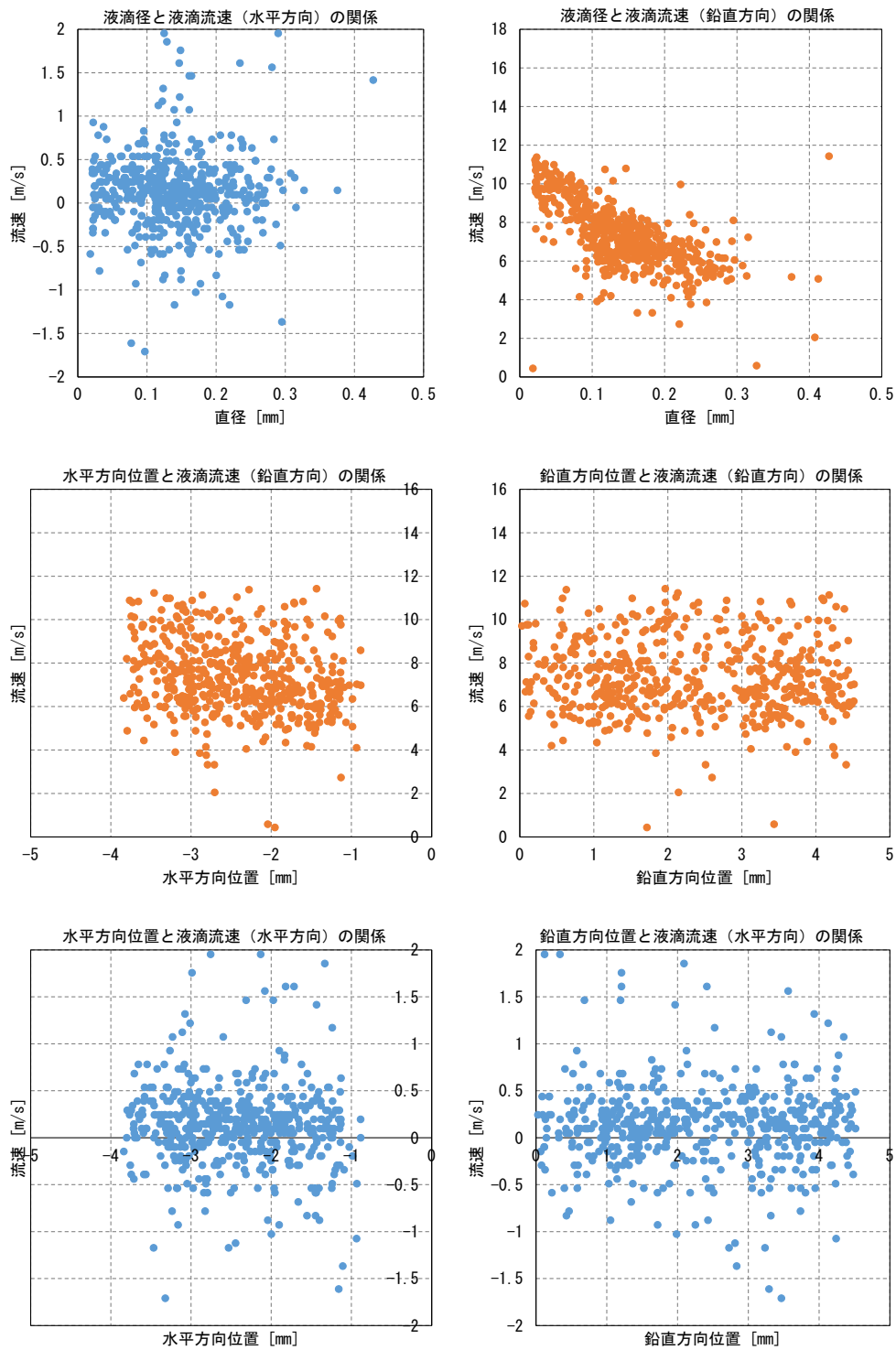


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (5/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 10m/s、サイド体系、スパーサ無)

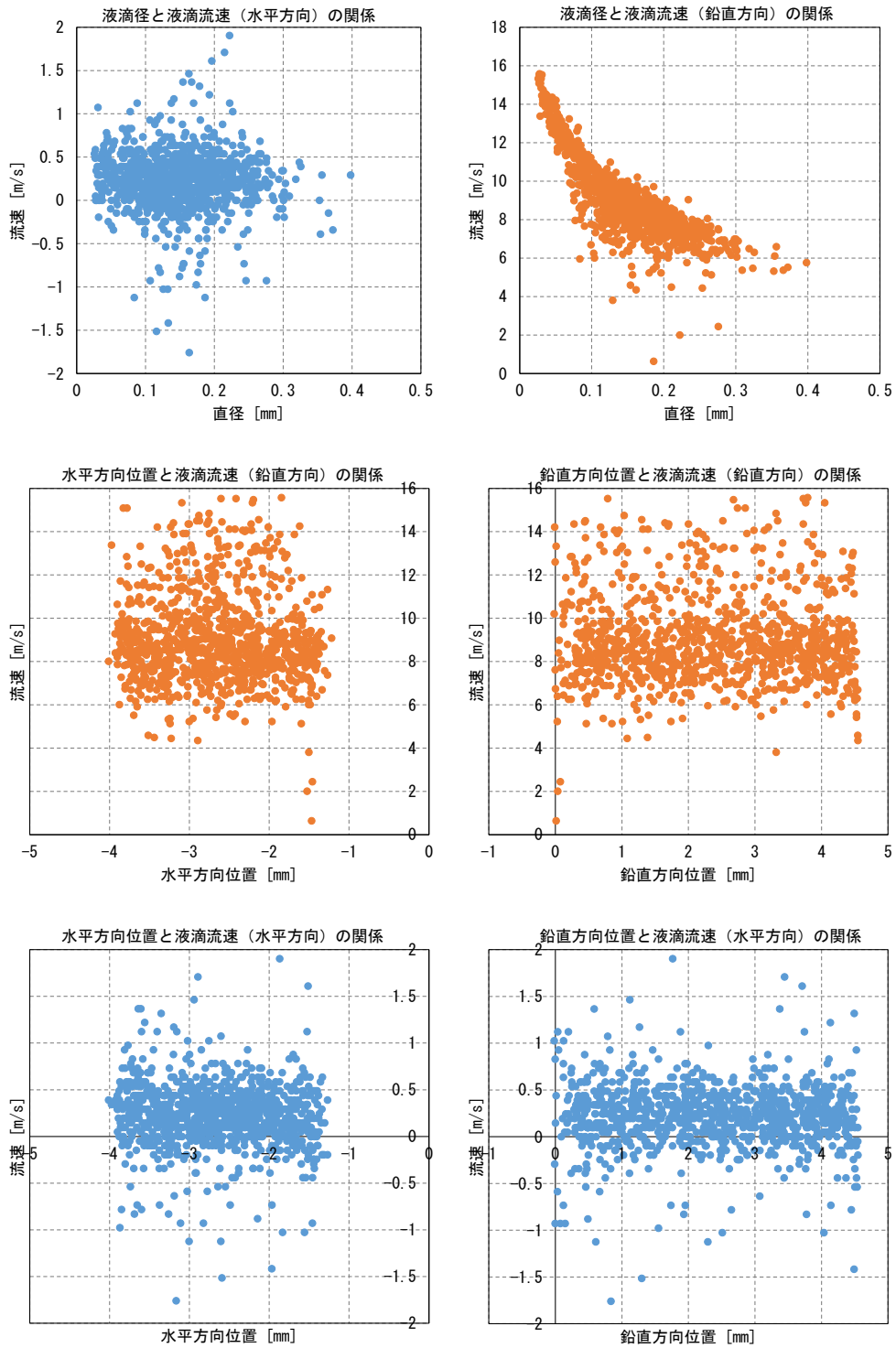


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (6/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 10m/s、サイド体系、丸セル型)

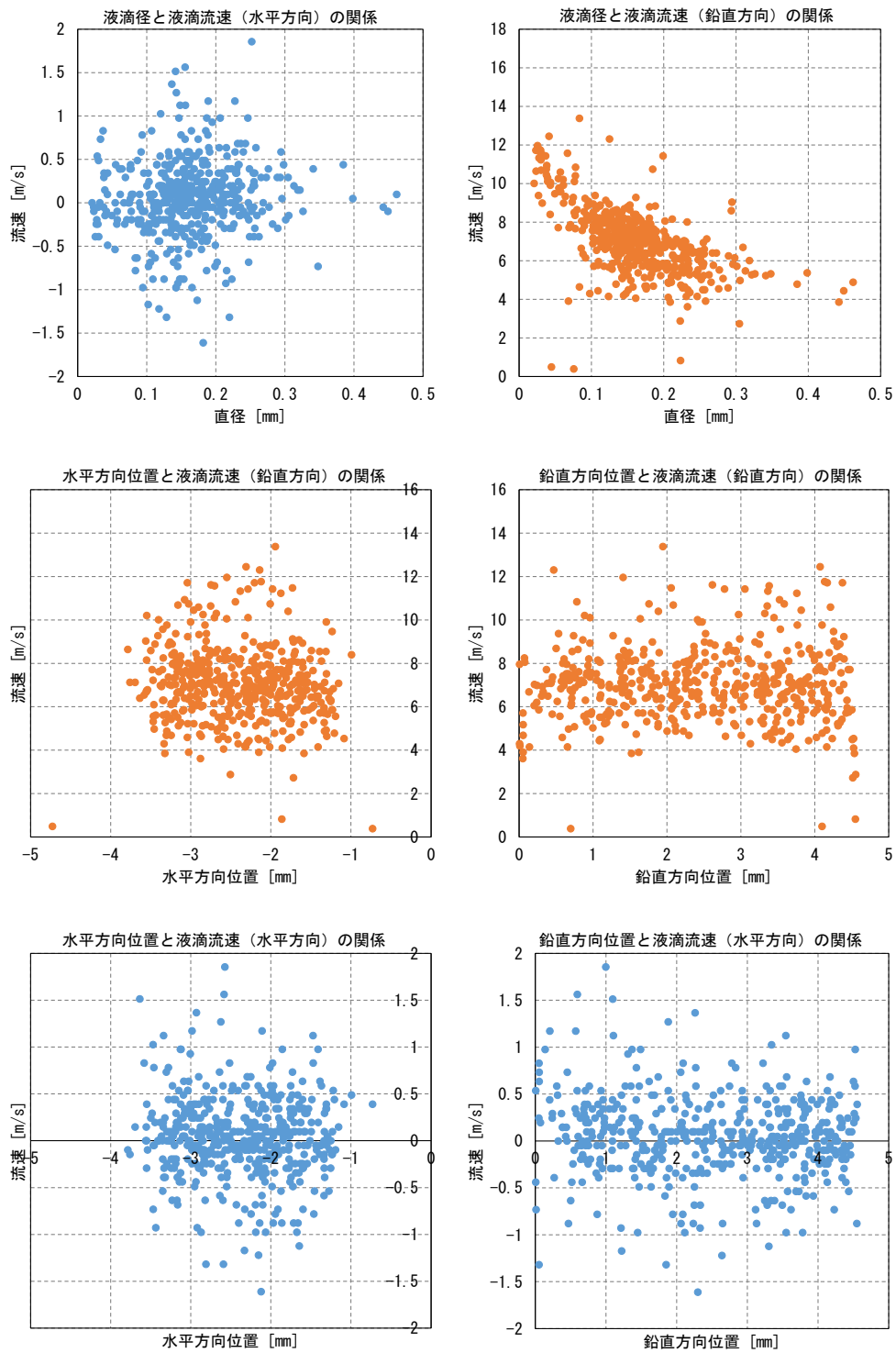


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (7/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 10m/s、サイド体系、グリッド型)

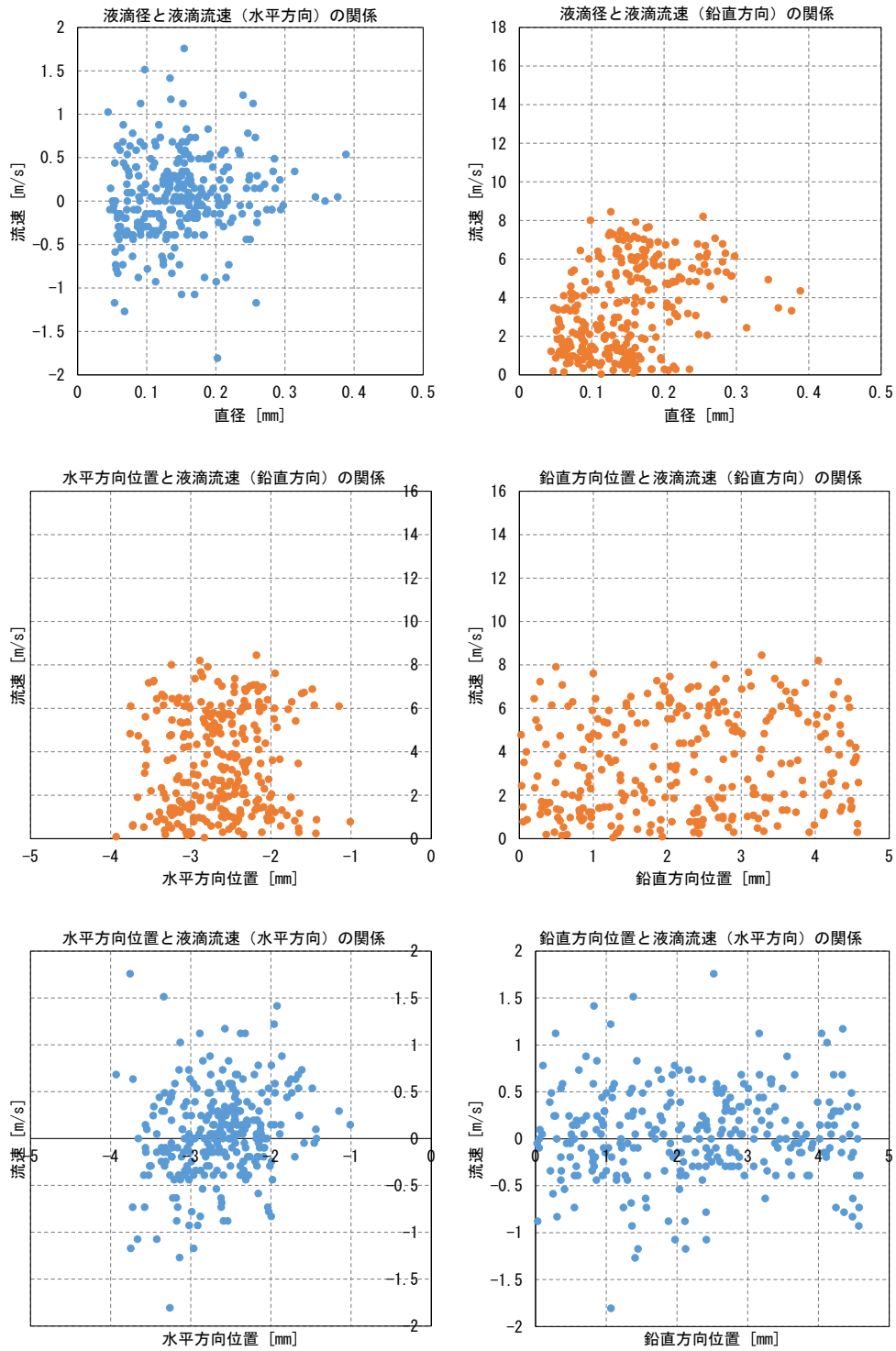


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (8/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 10m/s、サイド体系、丸セル型＋フロー
 タブ)

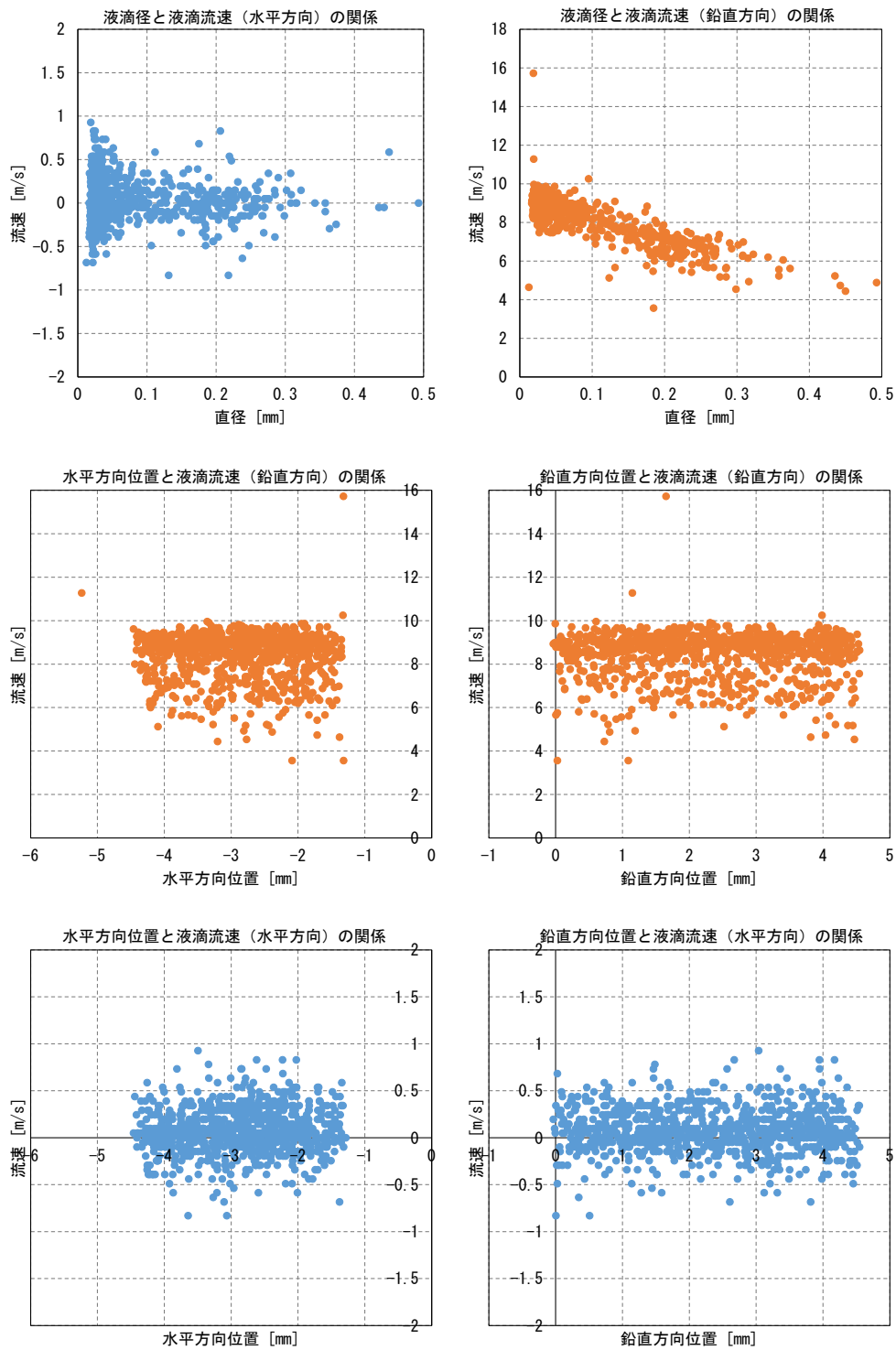


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (9/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 7m/s、センター体系、スパーサ無)

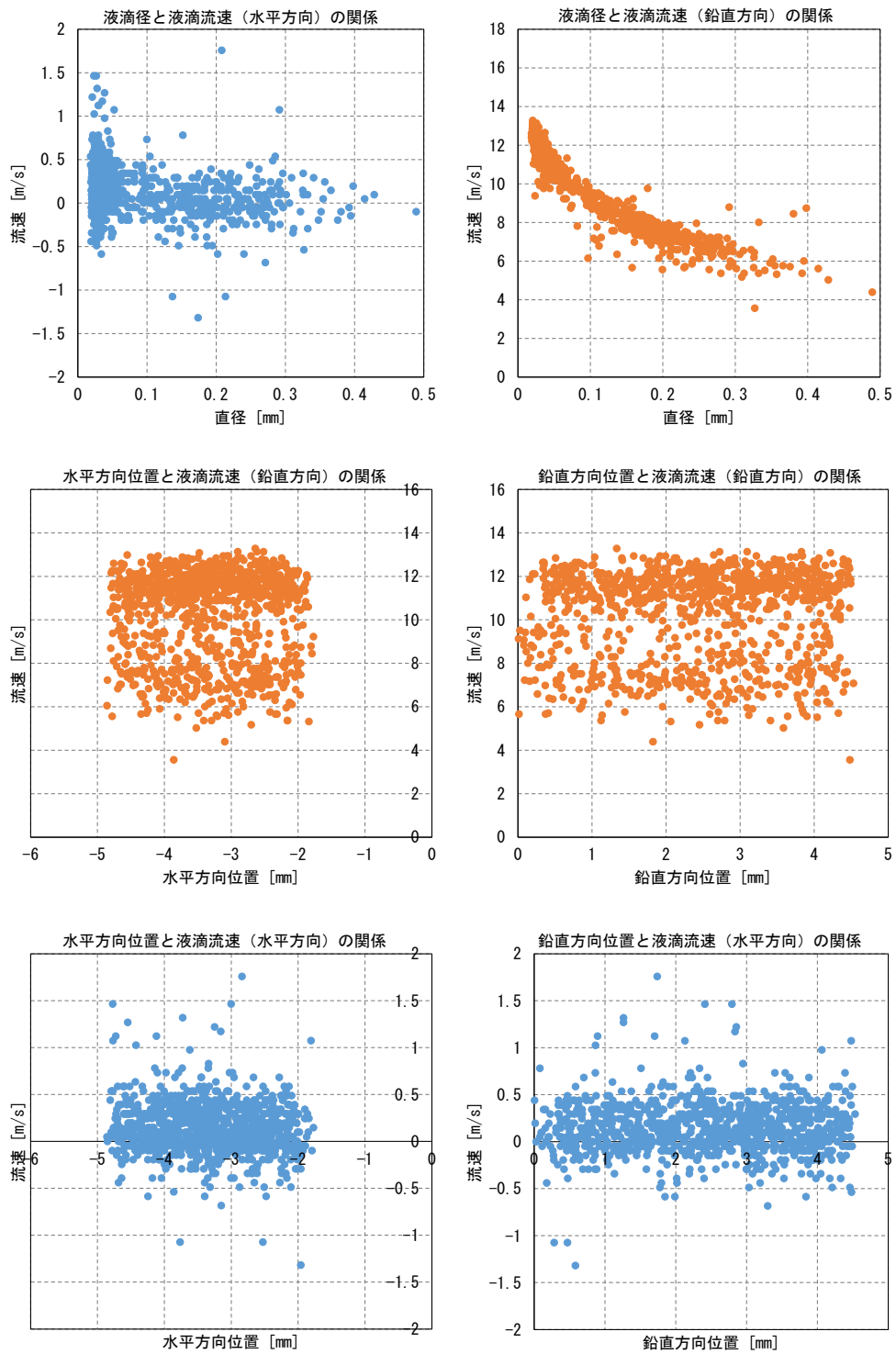


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (10/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 7m/s、センター体系、丸セル型)

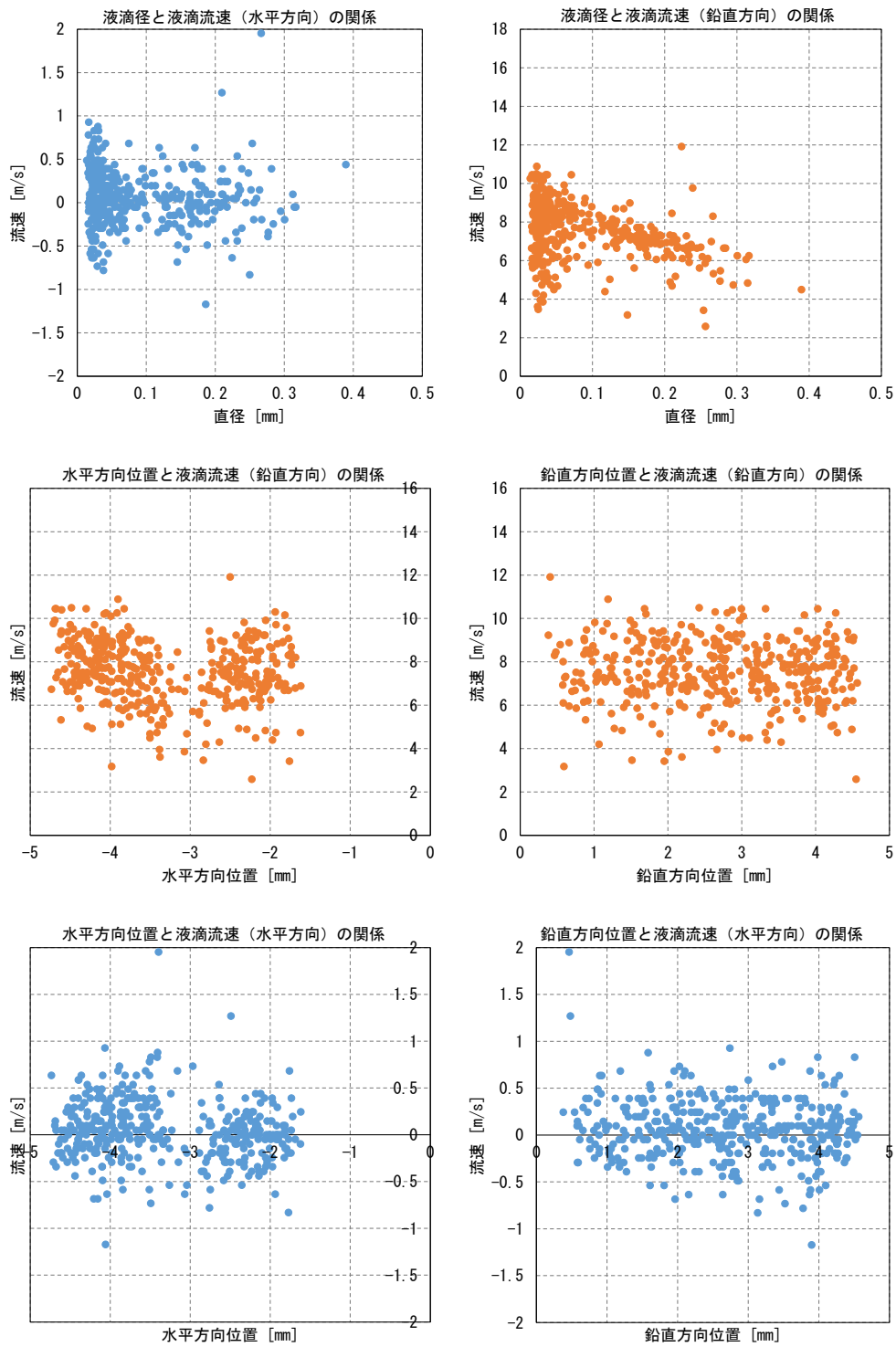


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (11/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 7m/s、センター体系、グリッド型)

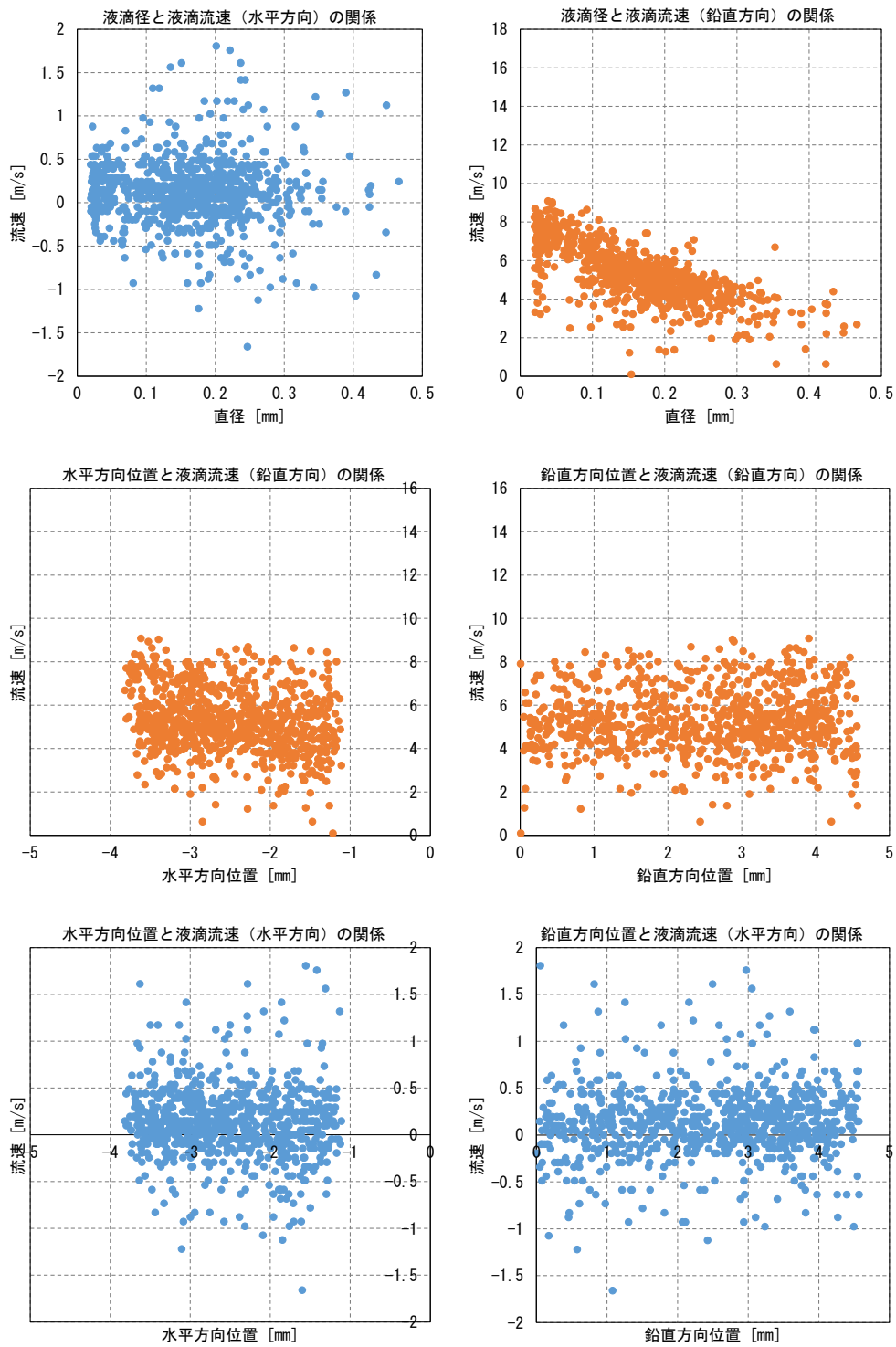


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (12/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 7m/s、サイド体系、スパーサ無)

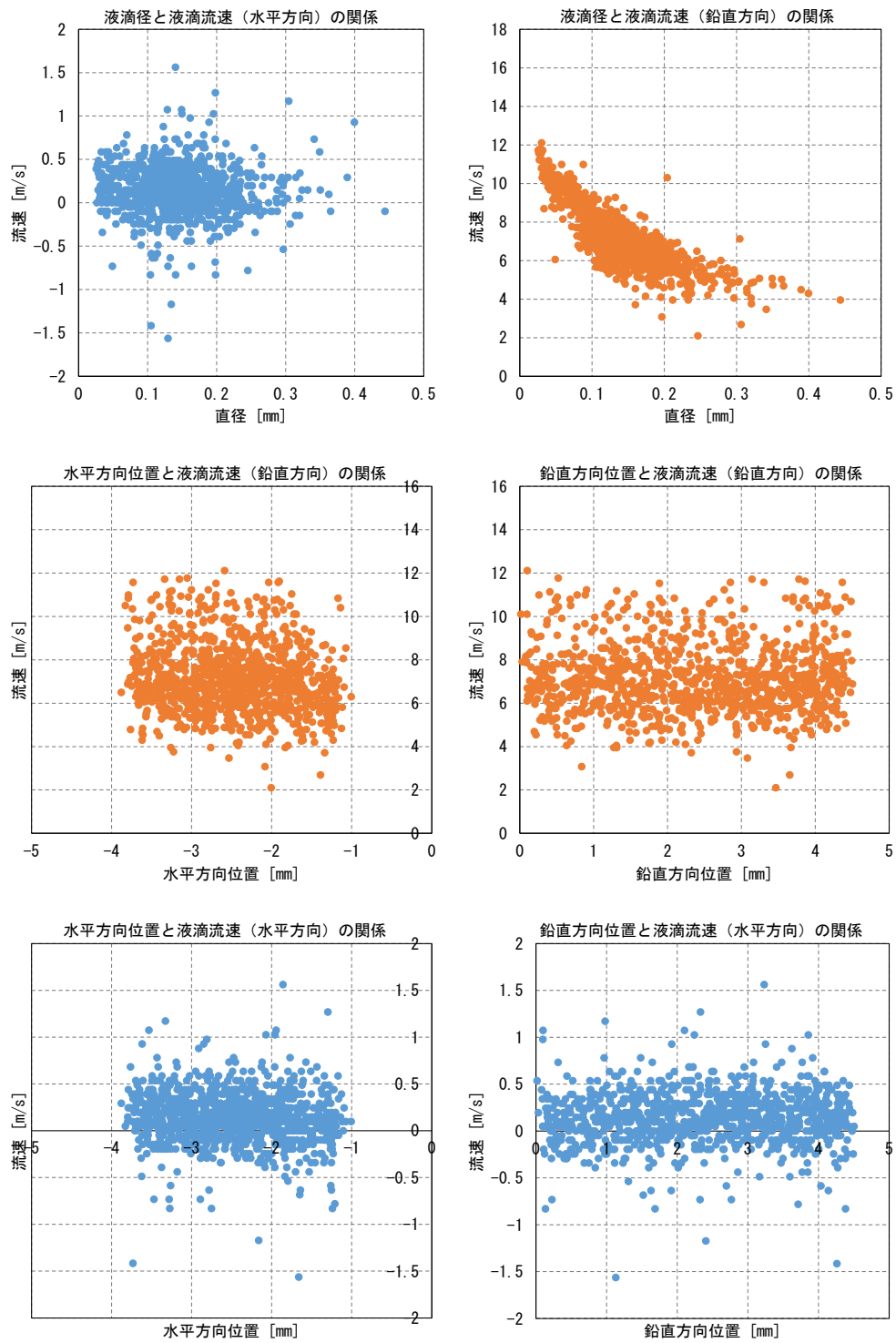


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (13/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 7m/s、サイド体系、丸セル型)

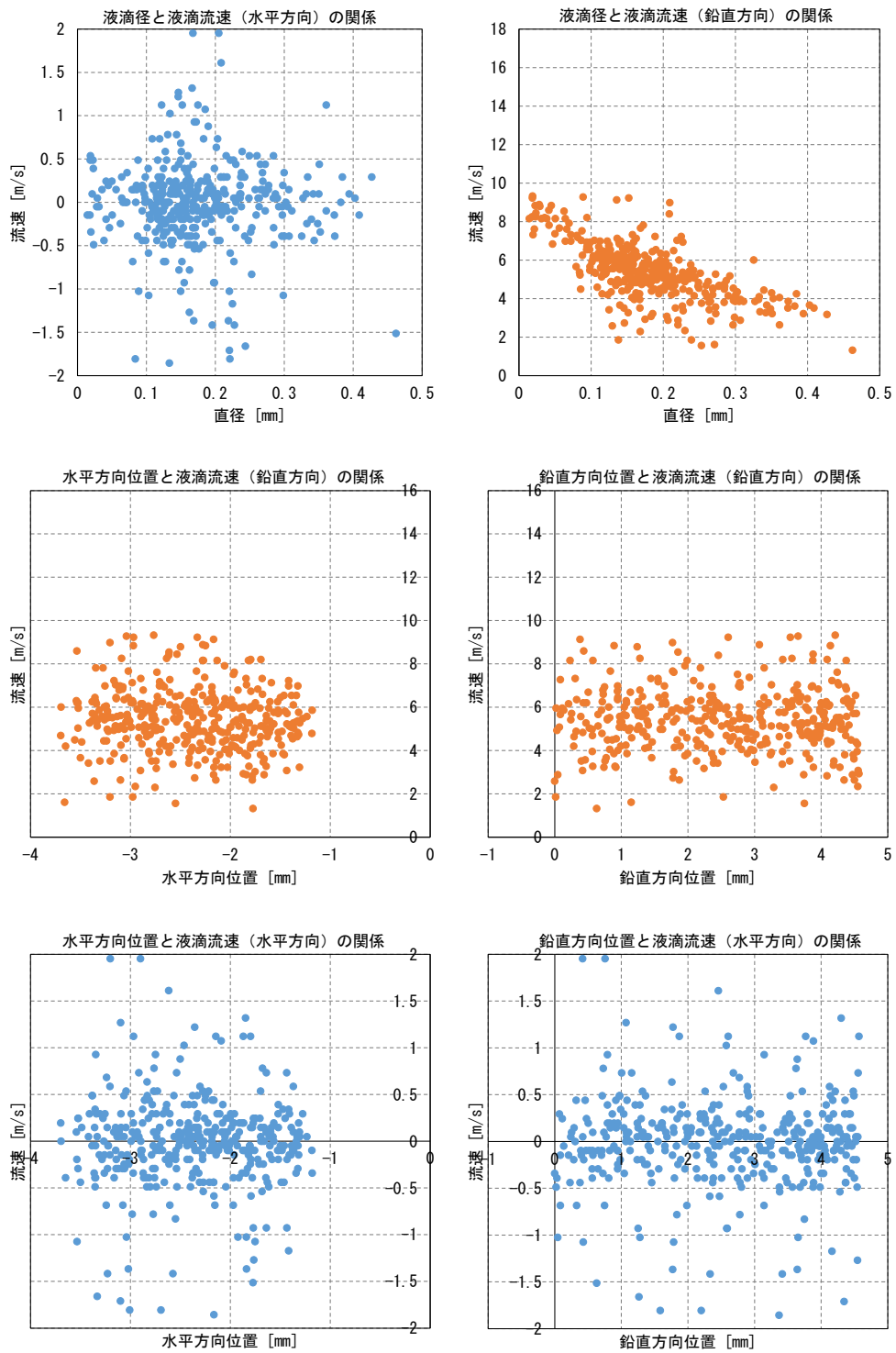


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (14/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 7m/s、サイド体系、グリッド型)

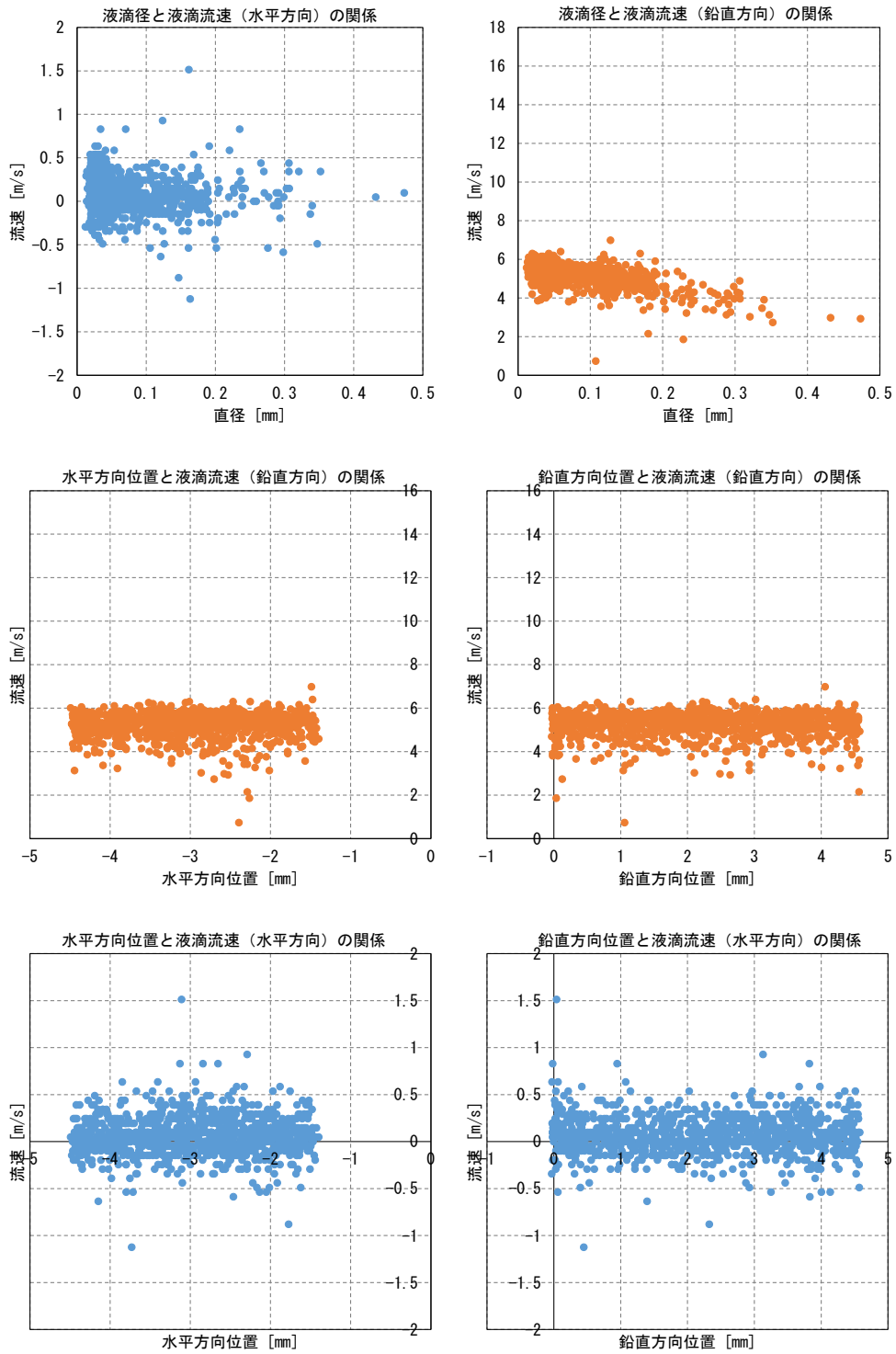


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (15/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 4m/s、センター体系、スプレーサ無)

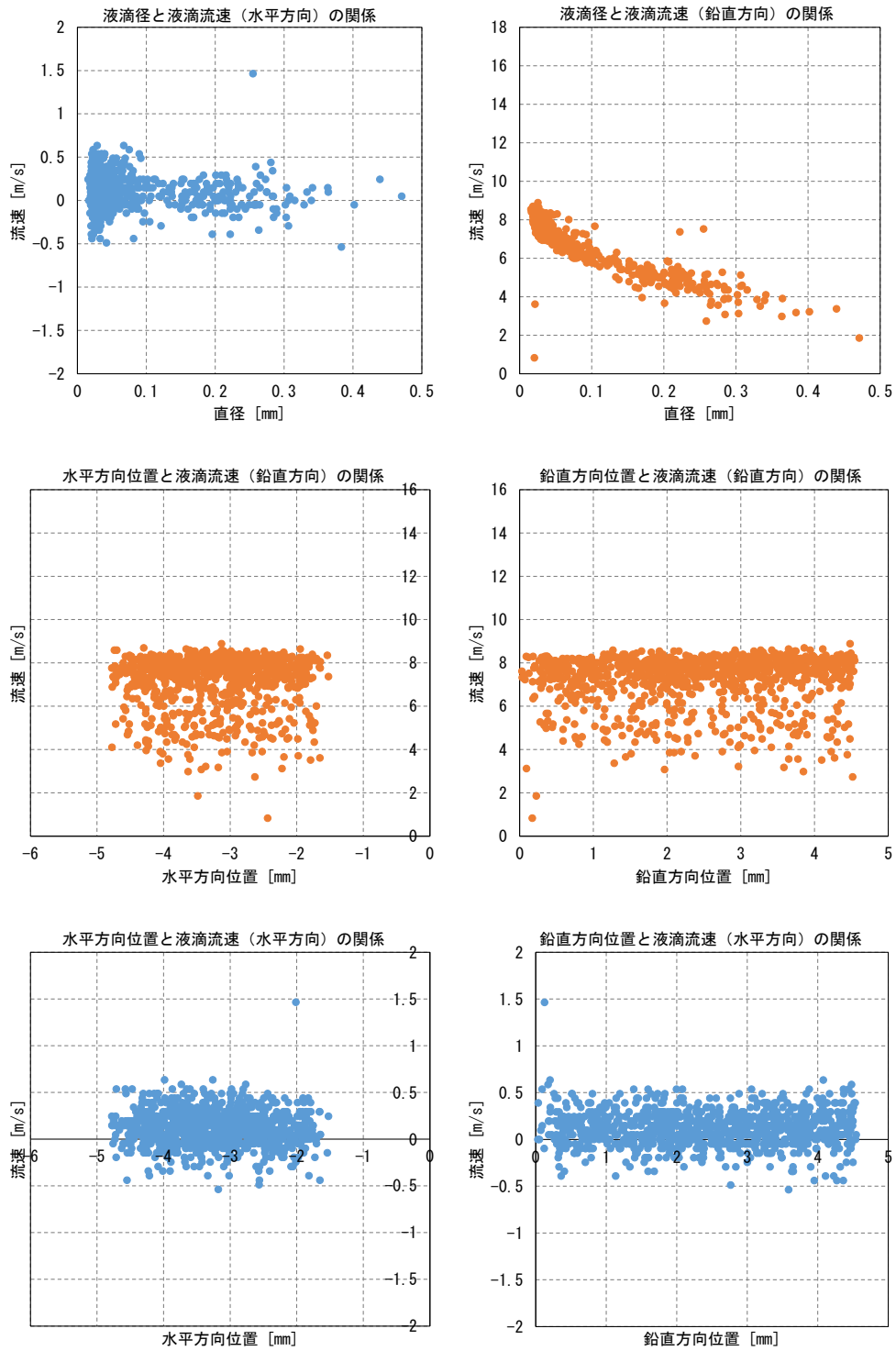


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (16/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 4m/s、センター体系、丸セル型)

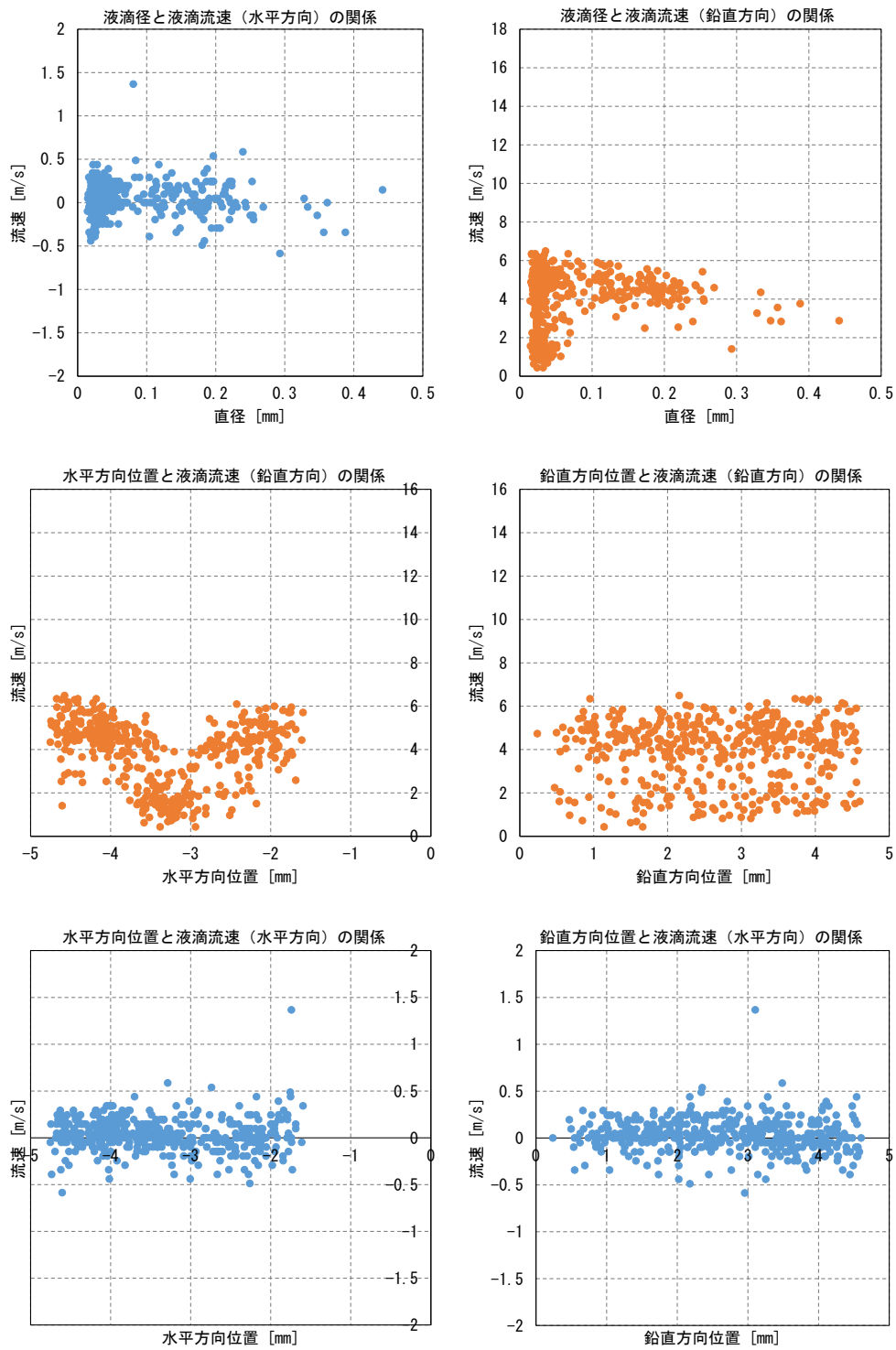


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (17/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 4m/s、センター体系、グリッド型)

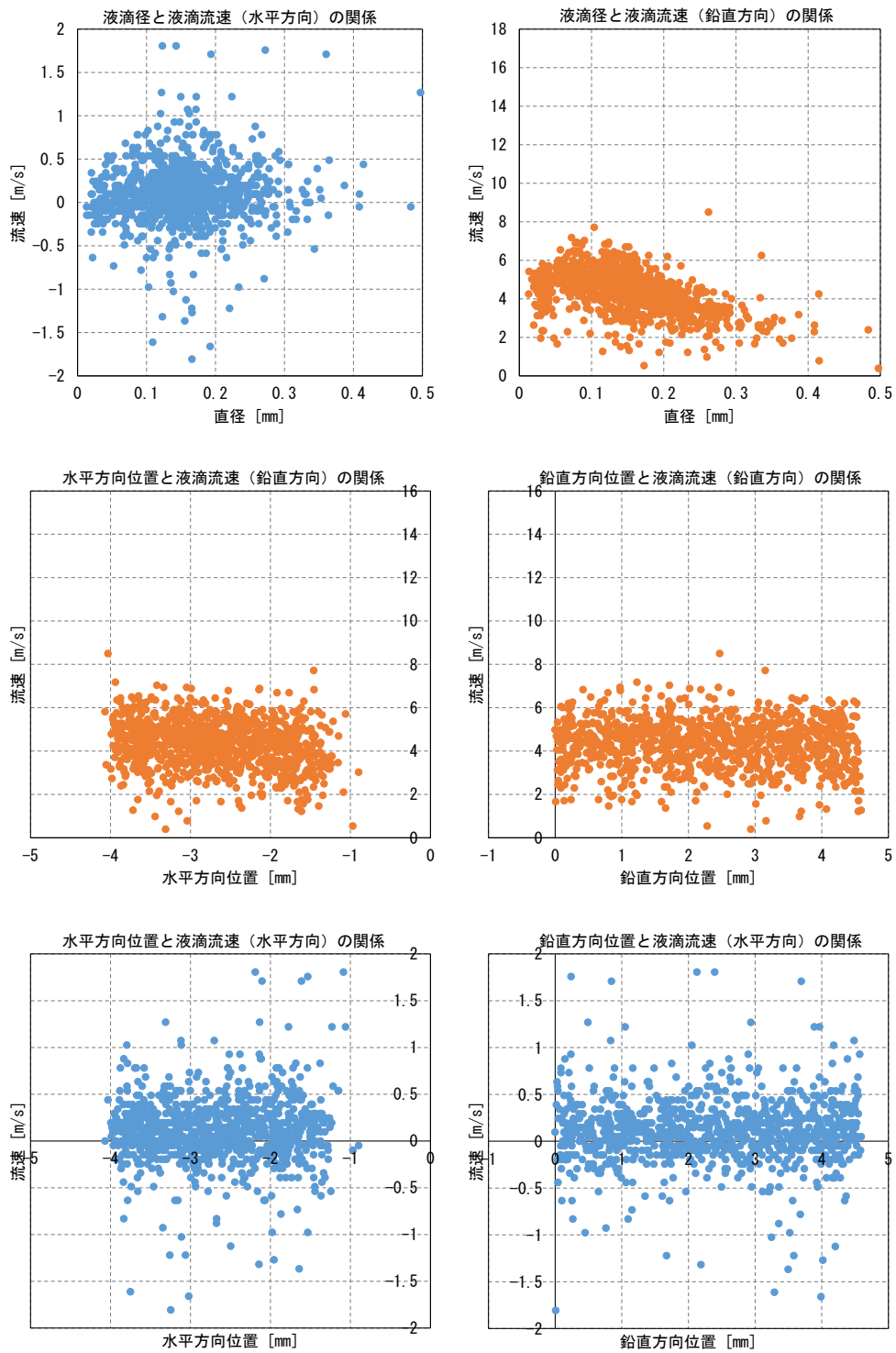


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (18/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 4m/s、サイド体系、スパーサ無)

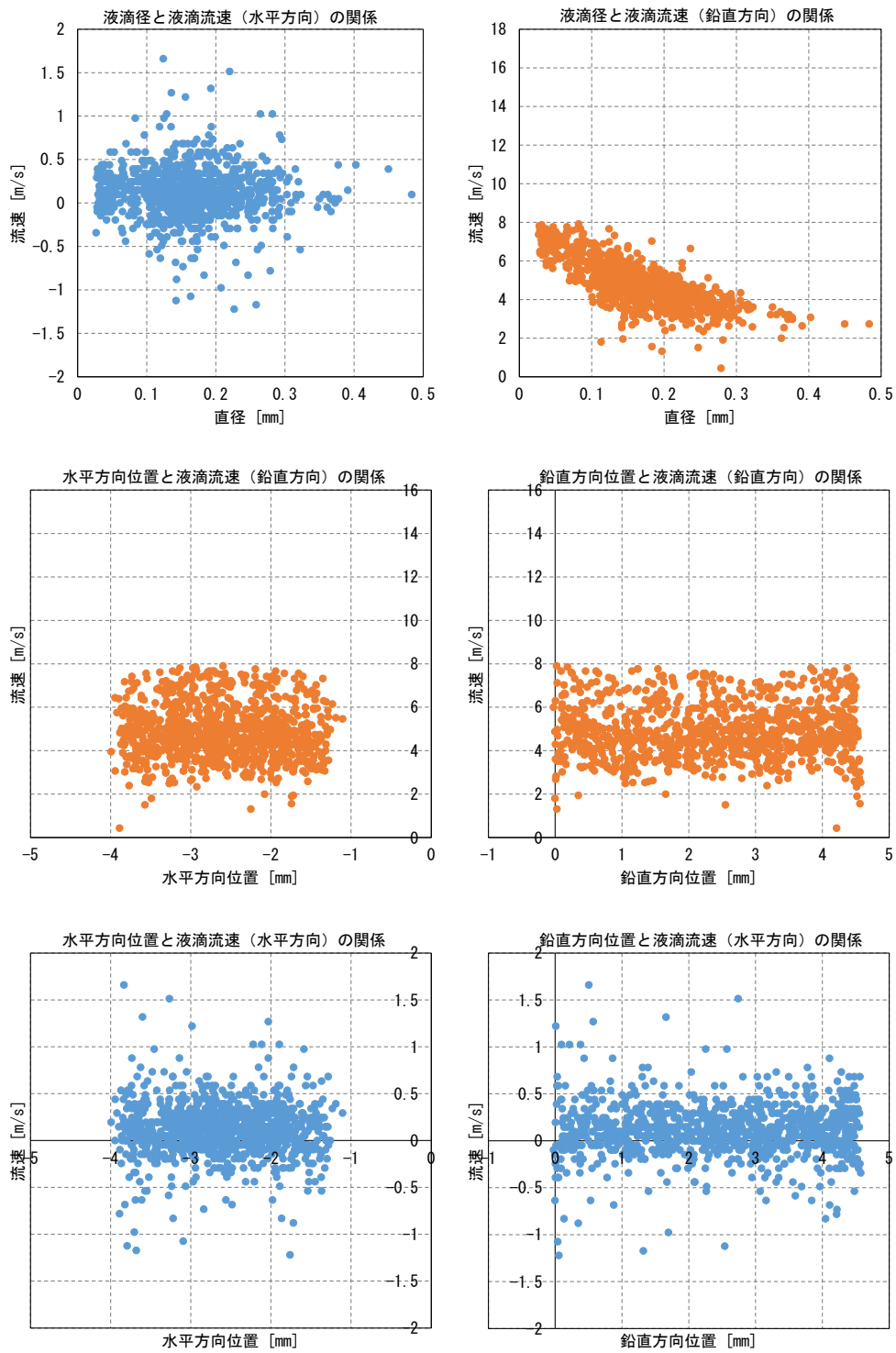


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (19/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 4m/s、サイド体系、丸セル型)

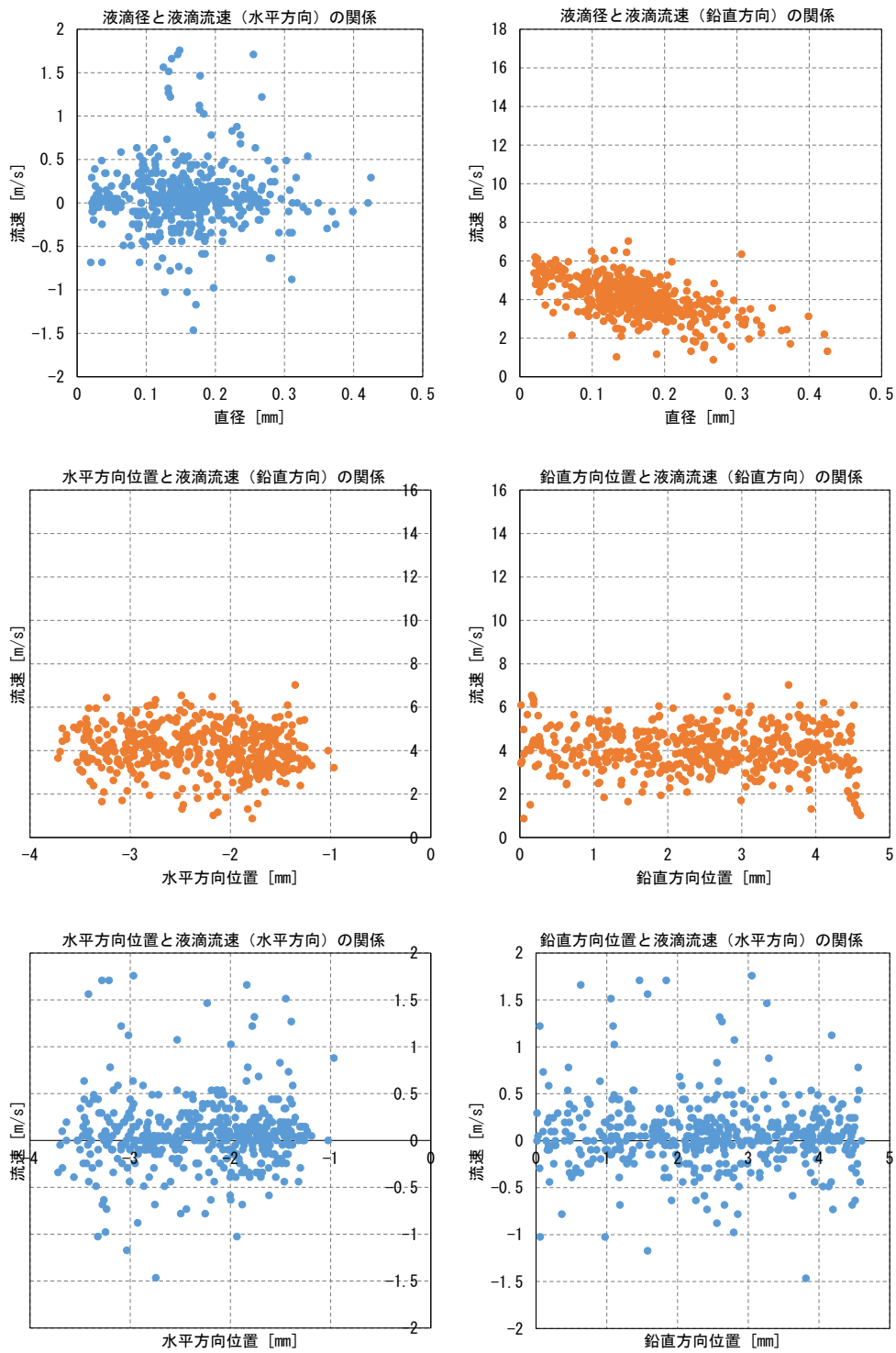


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (20/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 4m/s、サイド体系、グリッド型)

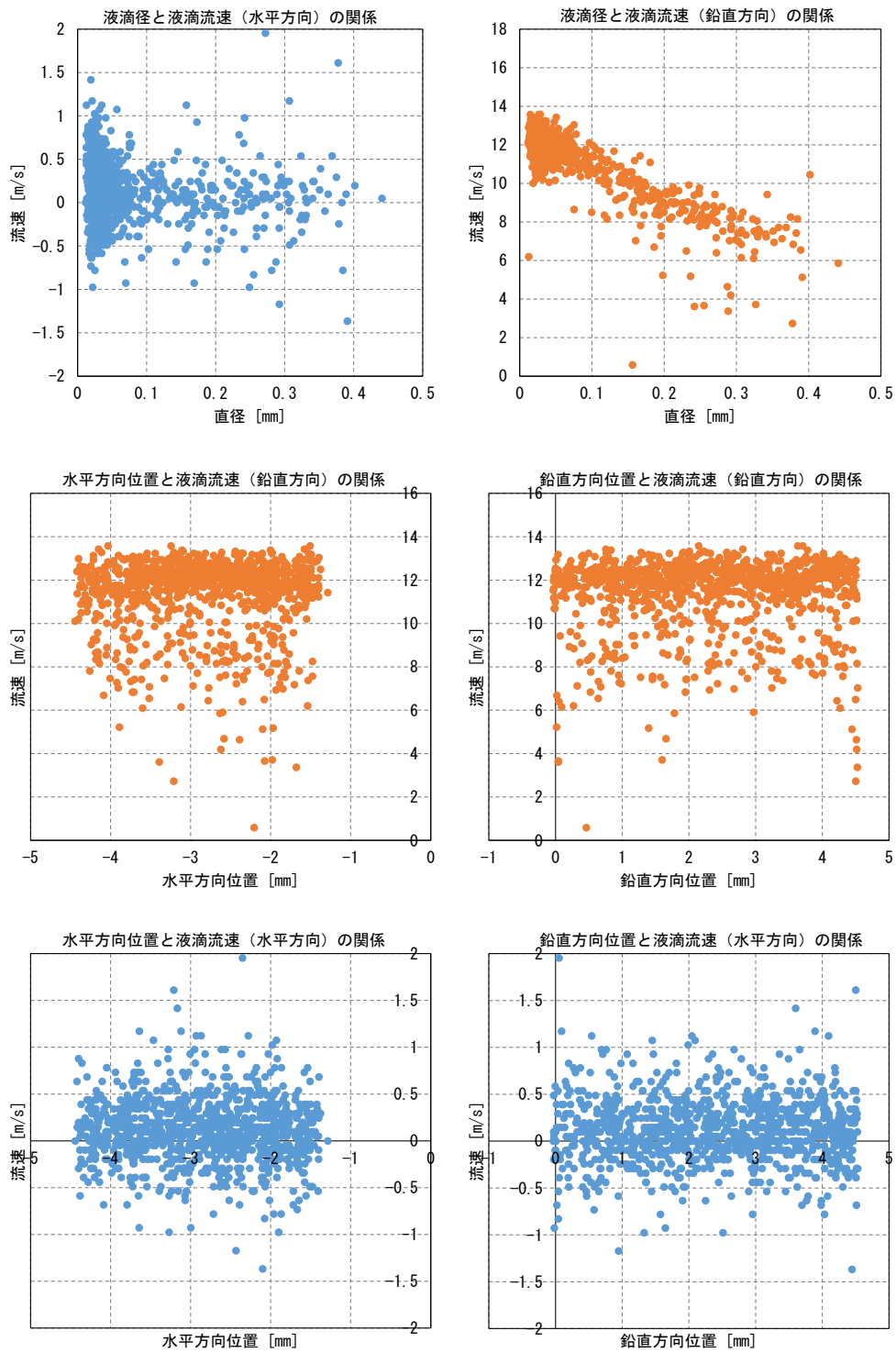


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (21/56：液滴放出量 144mg/min、空気流速平均値 10m/s、センター体系、スパーサ無)

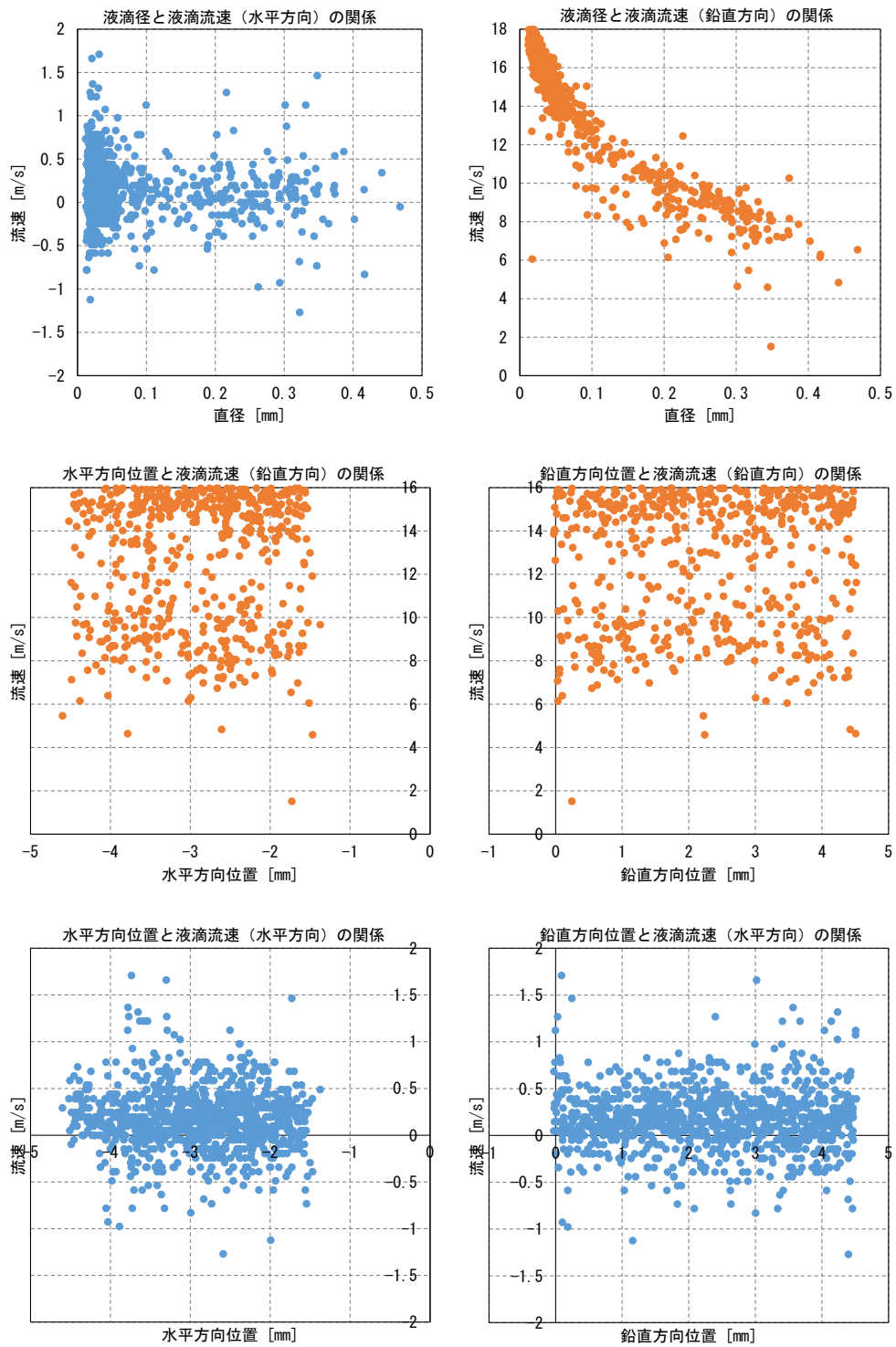


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (22/56：液滴放出量 144mg/min、空気流速平均値 10m/s、センター体系、丸セル型)



図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (23/56：液滴放出量 144mg/min、空気流速平均値 10m/s、センター体系、グリッド型)

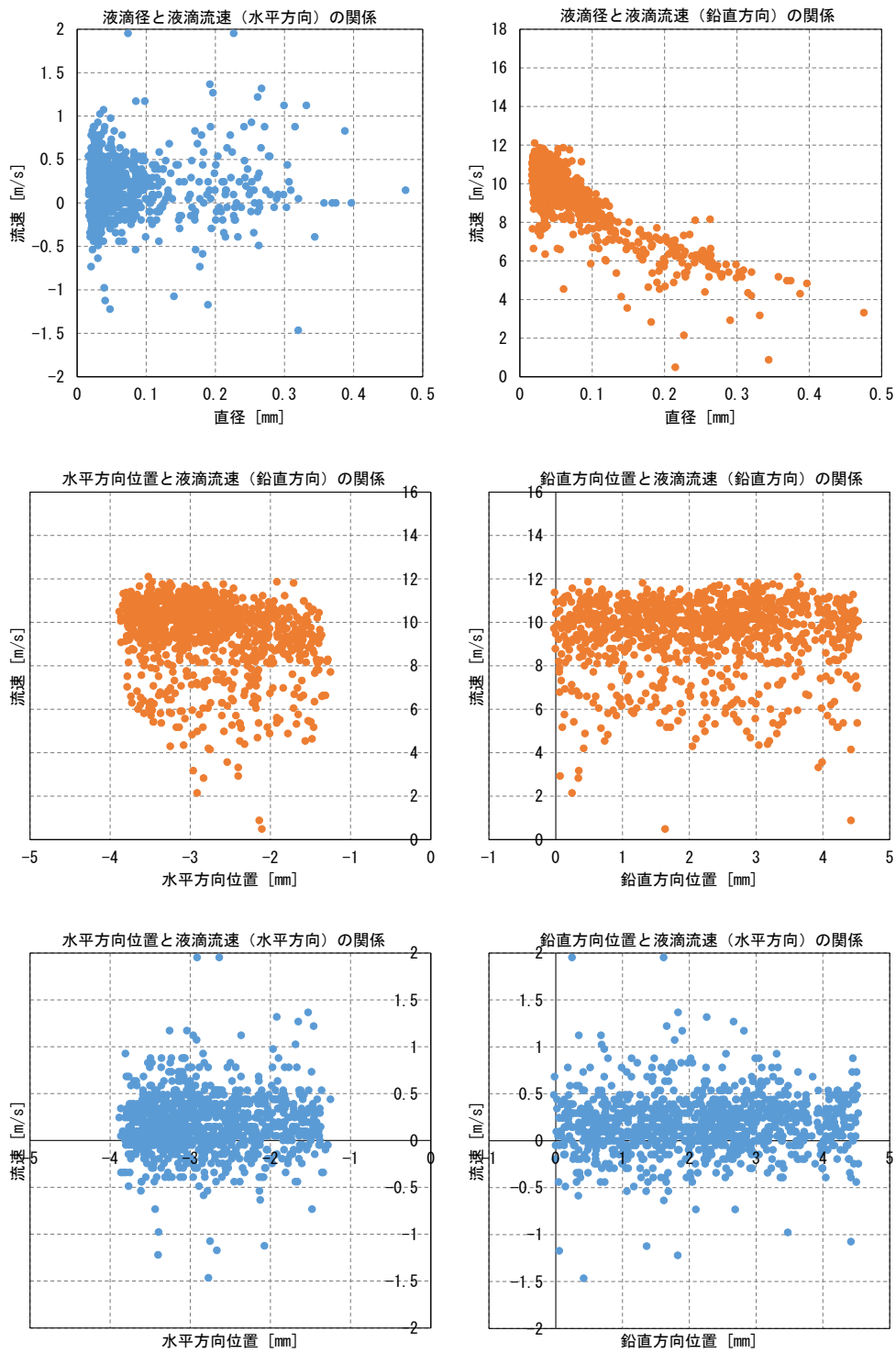


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (24/56：液滴放出量 144mg/min、空気流速平均値 10m/s、サイド体系、スパーサ無)

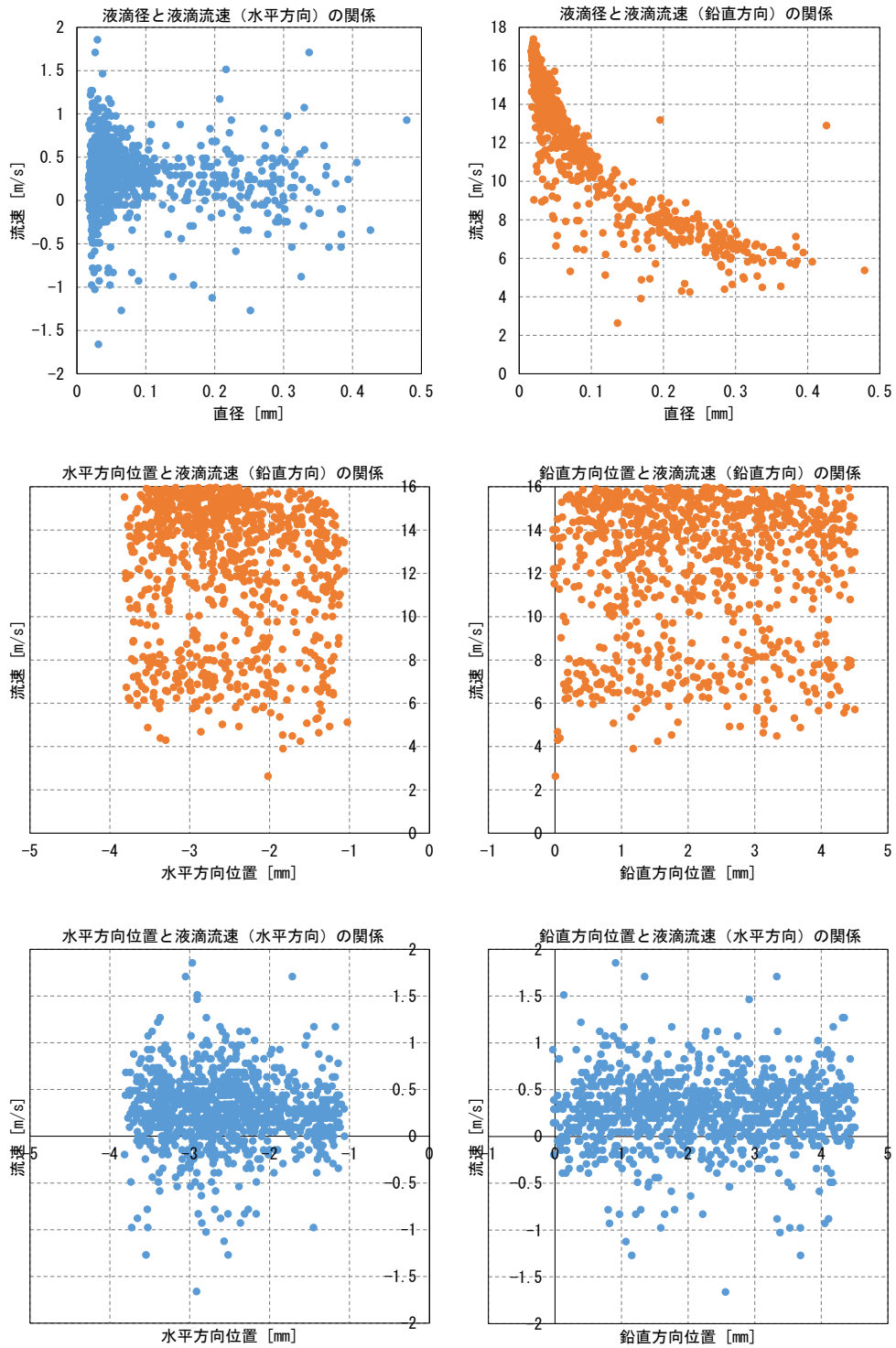


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (25/56：液滴放出量 144mg/min、空気流速平均値 10m/s、サイド体系、丸セル型)

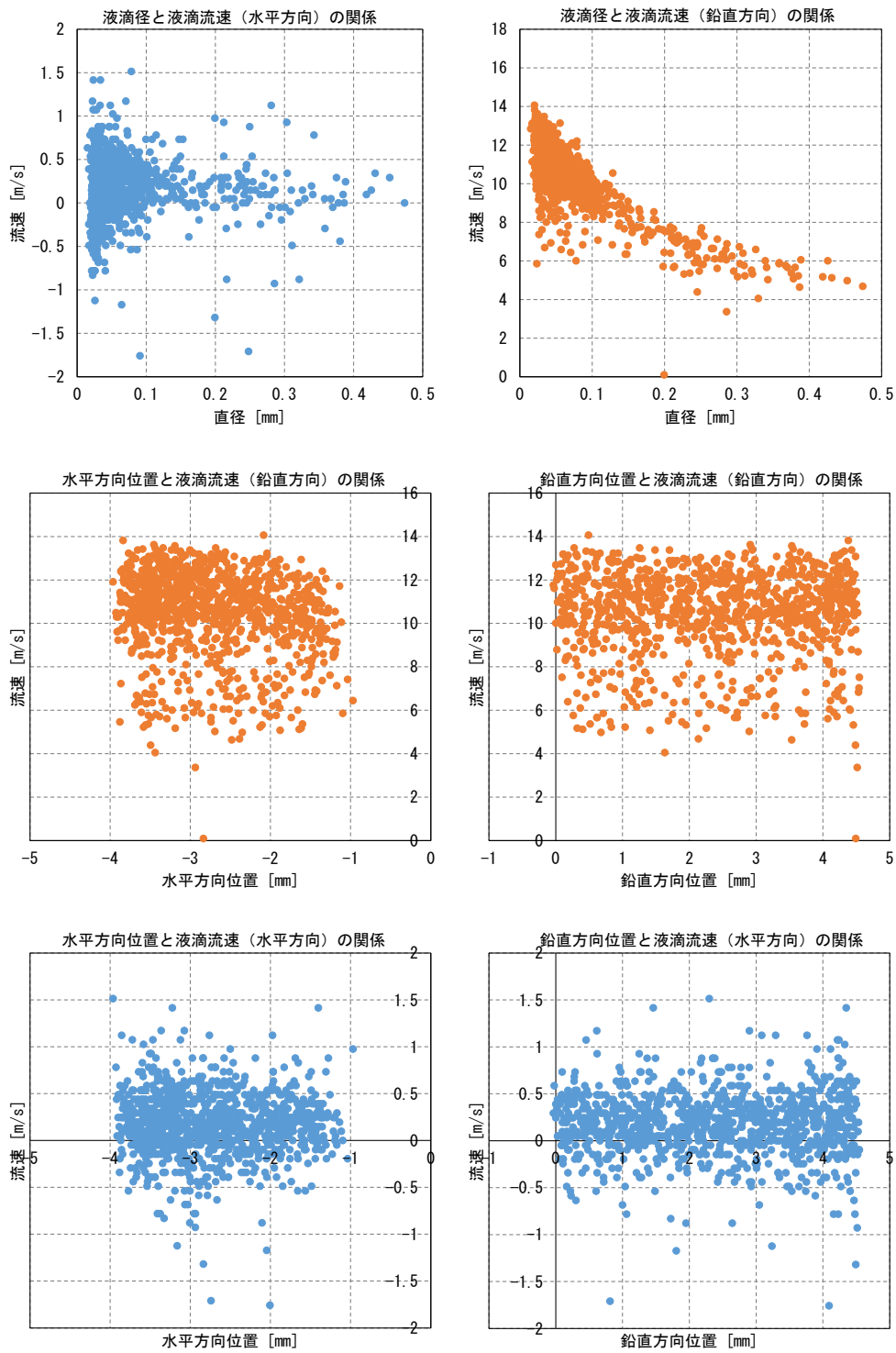


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (26/56：液滴放出量 144mg/min、空気流速平均値 10m/s、サイド体系、グリッド型)

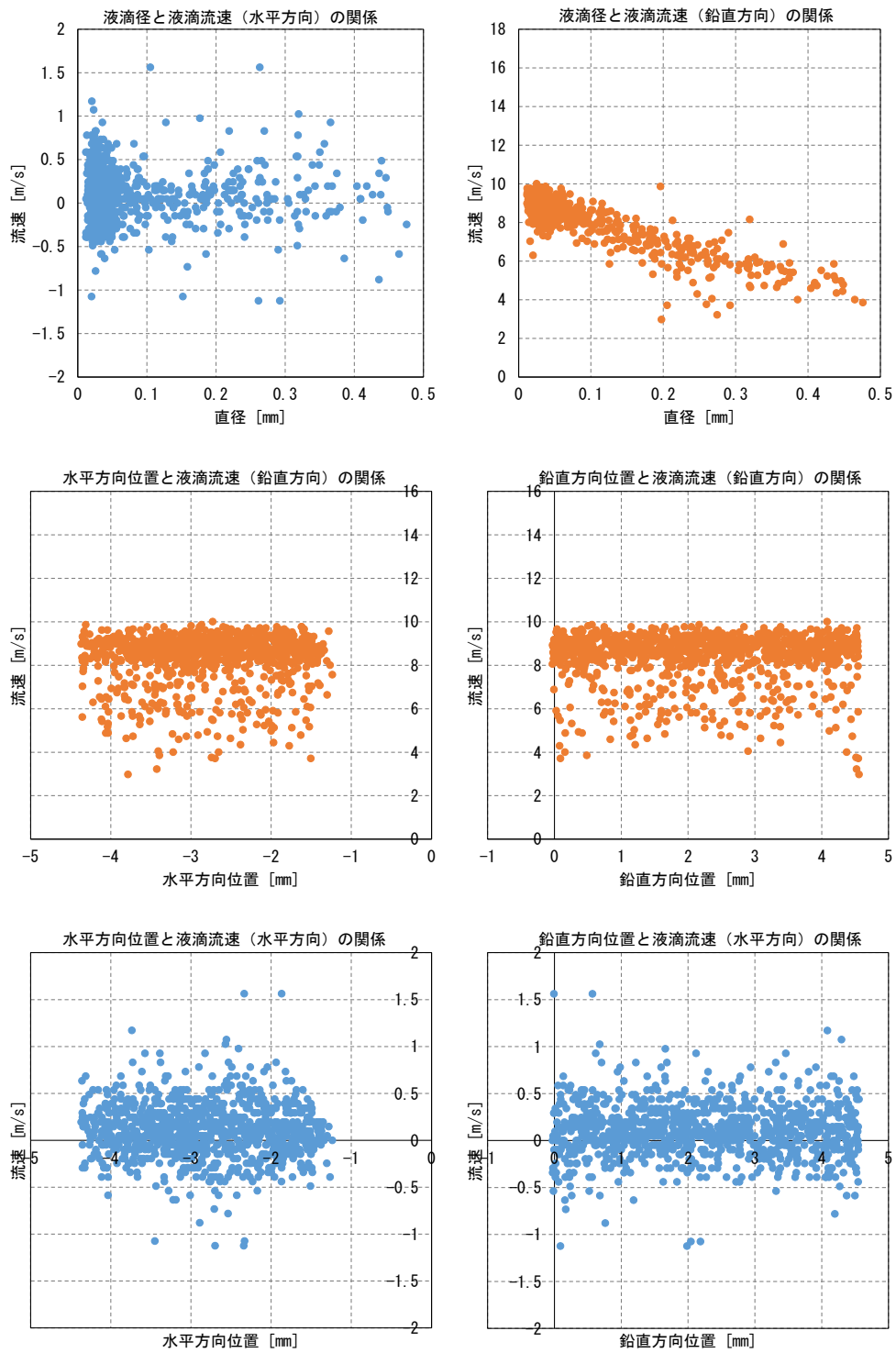


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (27/56：液滴放出量 144mg/min、空気流速平均値 7m/s、センター体系、スパーサ無)

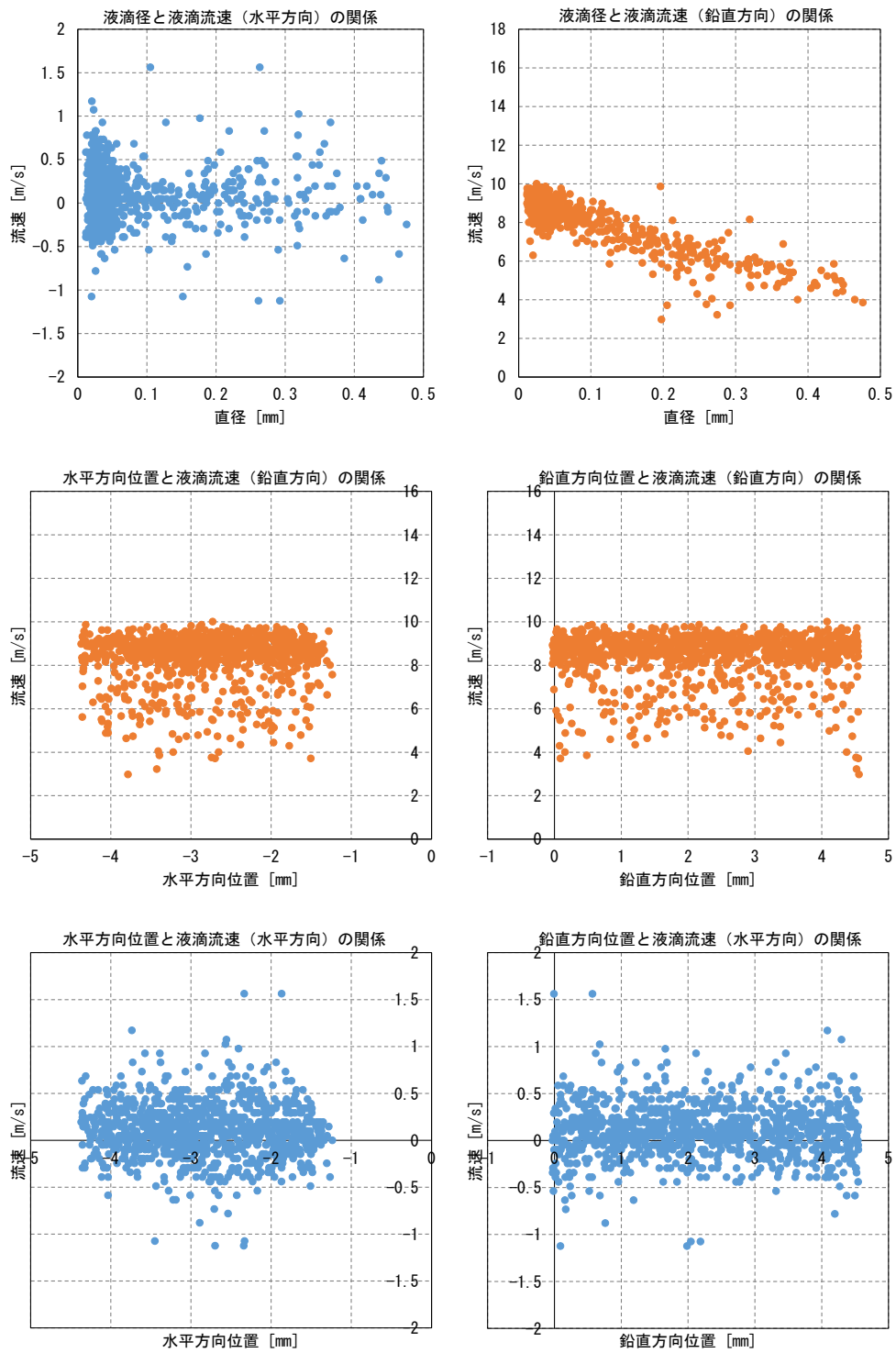


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (28/56：液滴放出量 144mg/min、空気流速平均値 7m/s、センター体系、丸セル型)

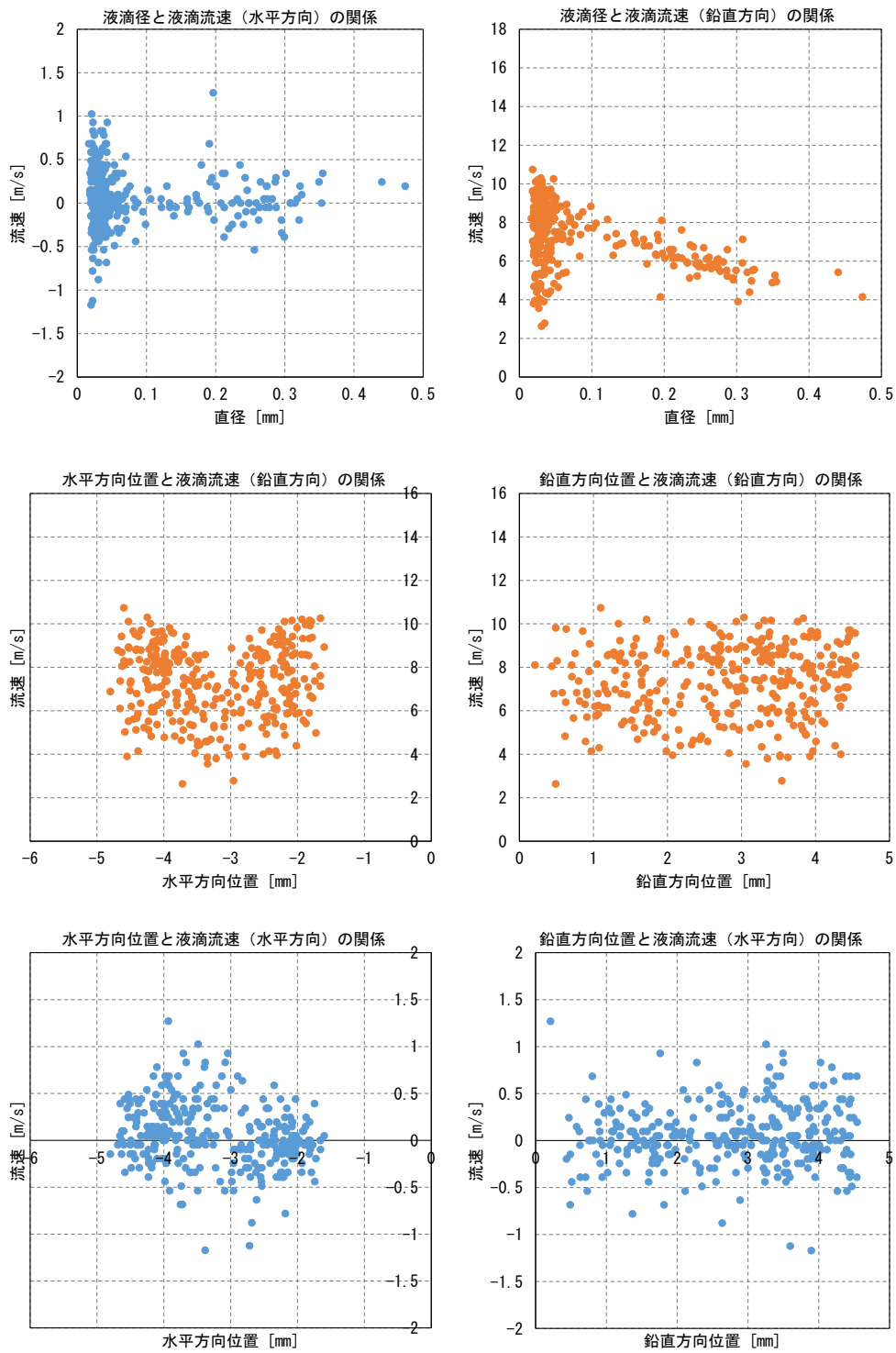


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (29/56：液滴放出量 144mg/min、空気流速平均値 7m/s、センター体系、グリッド型)

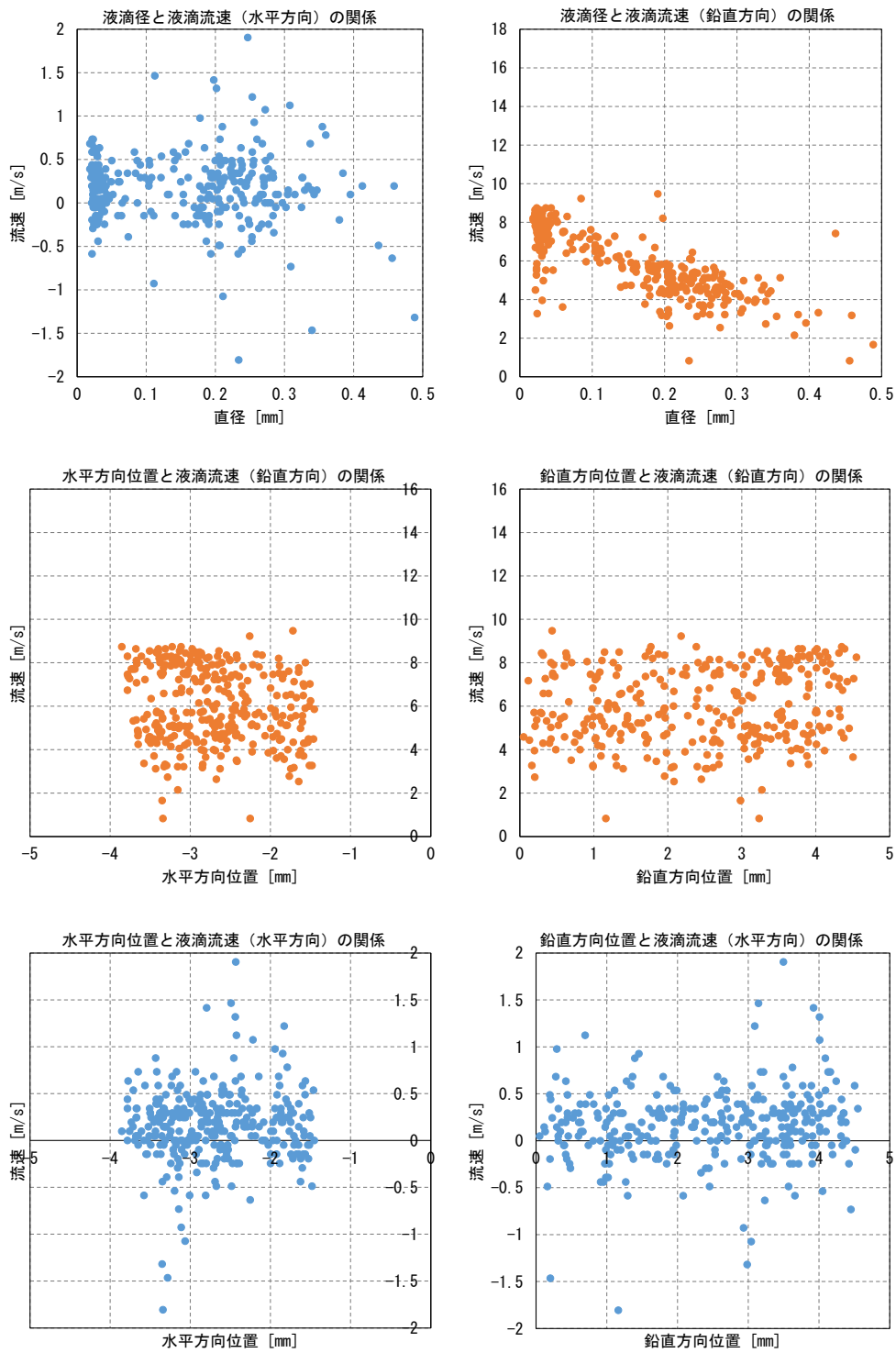


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (30/56：液滴放出量 144mg/min、空気流速平均値 7m/s、サイド体系、スパーサ無)

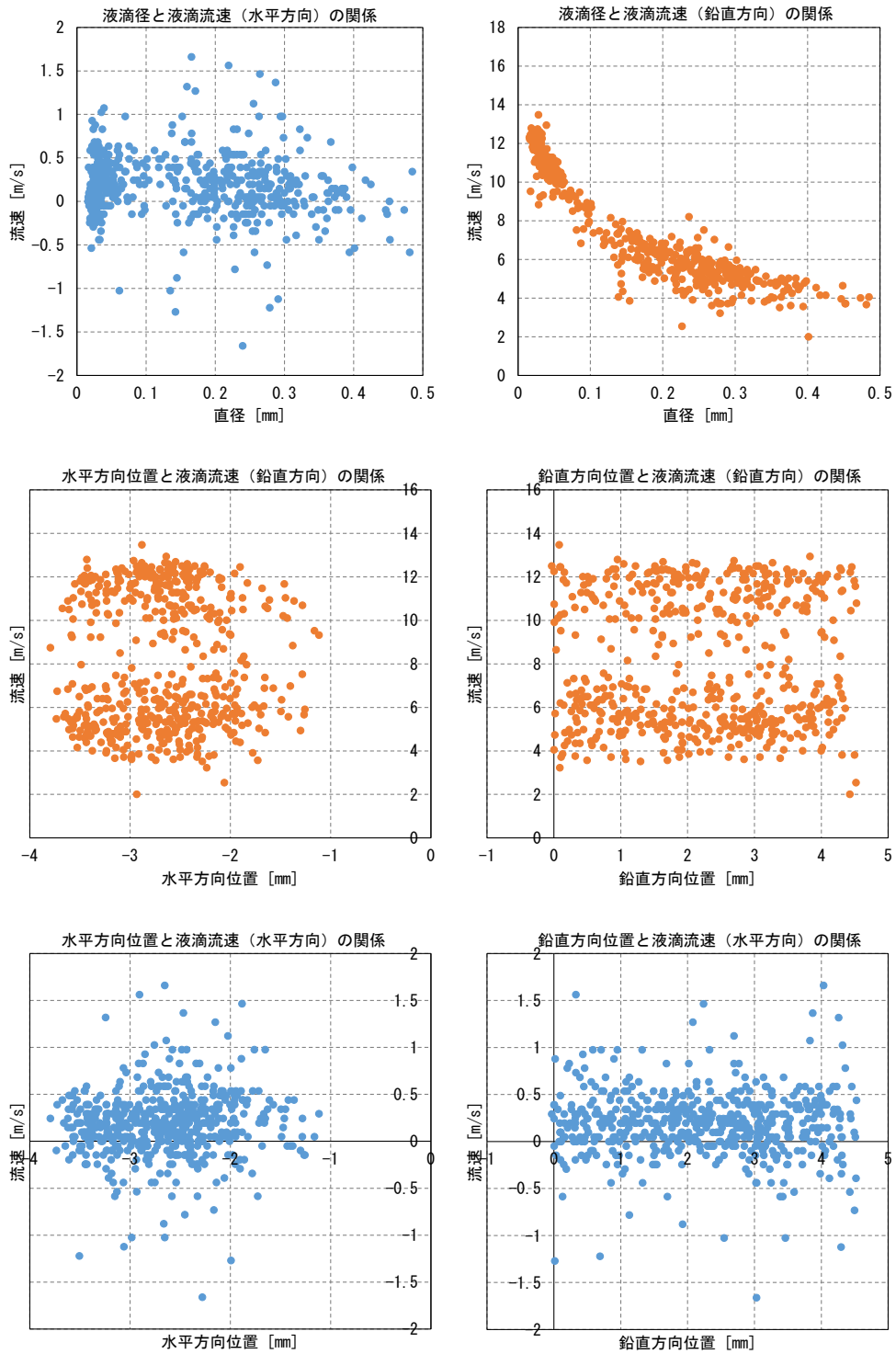


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (31/56：液滴放出量 144mg/min、空気流速平均値 7m/s、サイド体系、丸セル型)

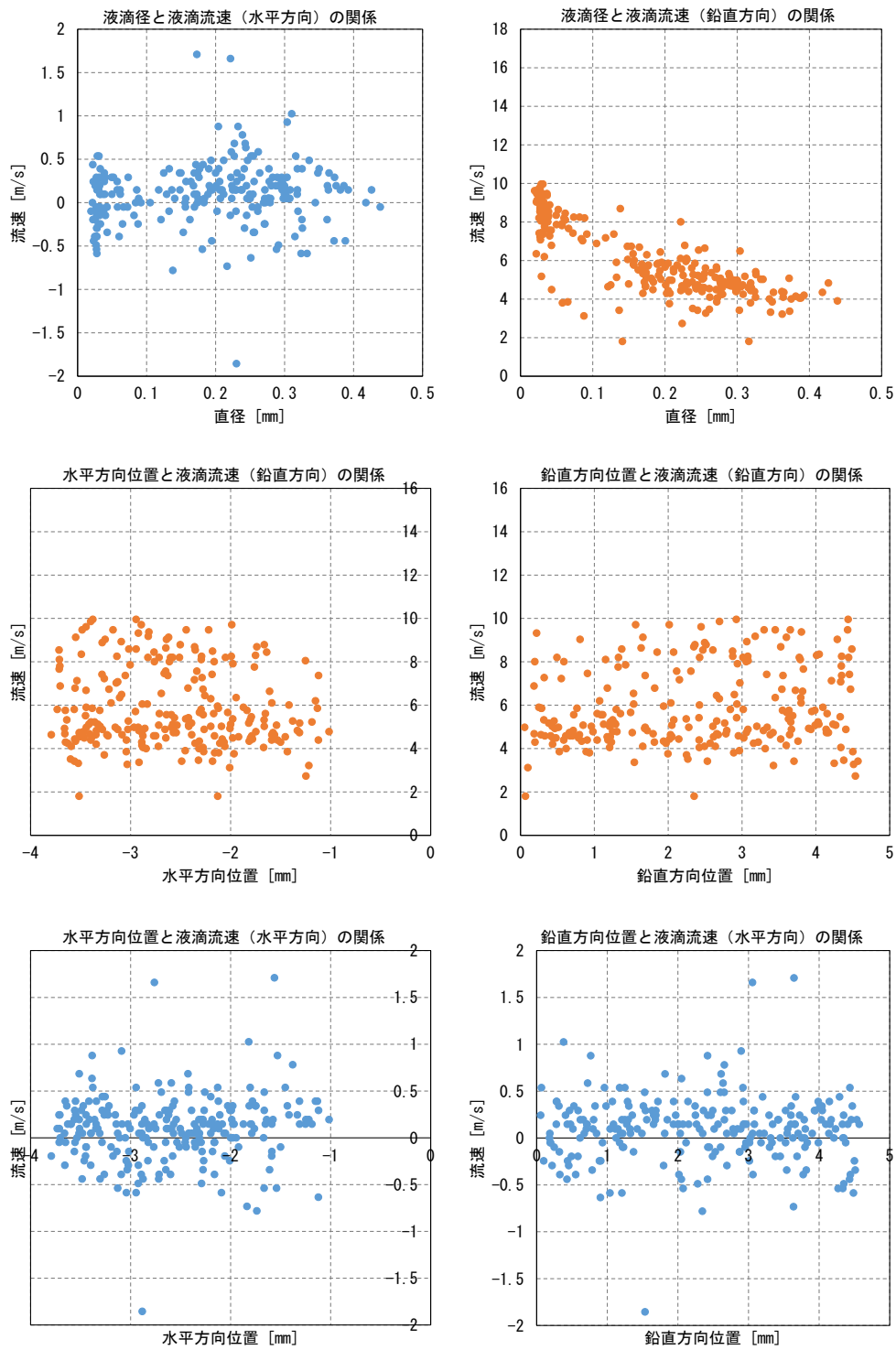


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (32/56：液滴放出量 144mg/min、空気流速平均値 7m/s、サイド体系、グリッド型)

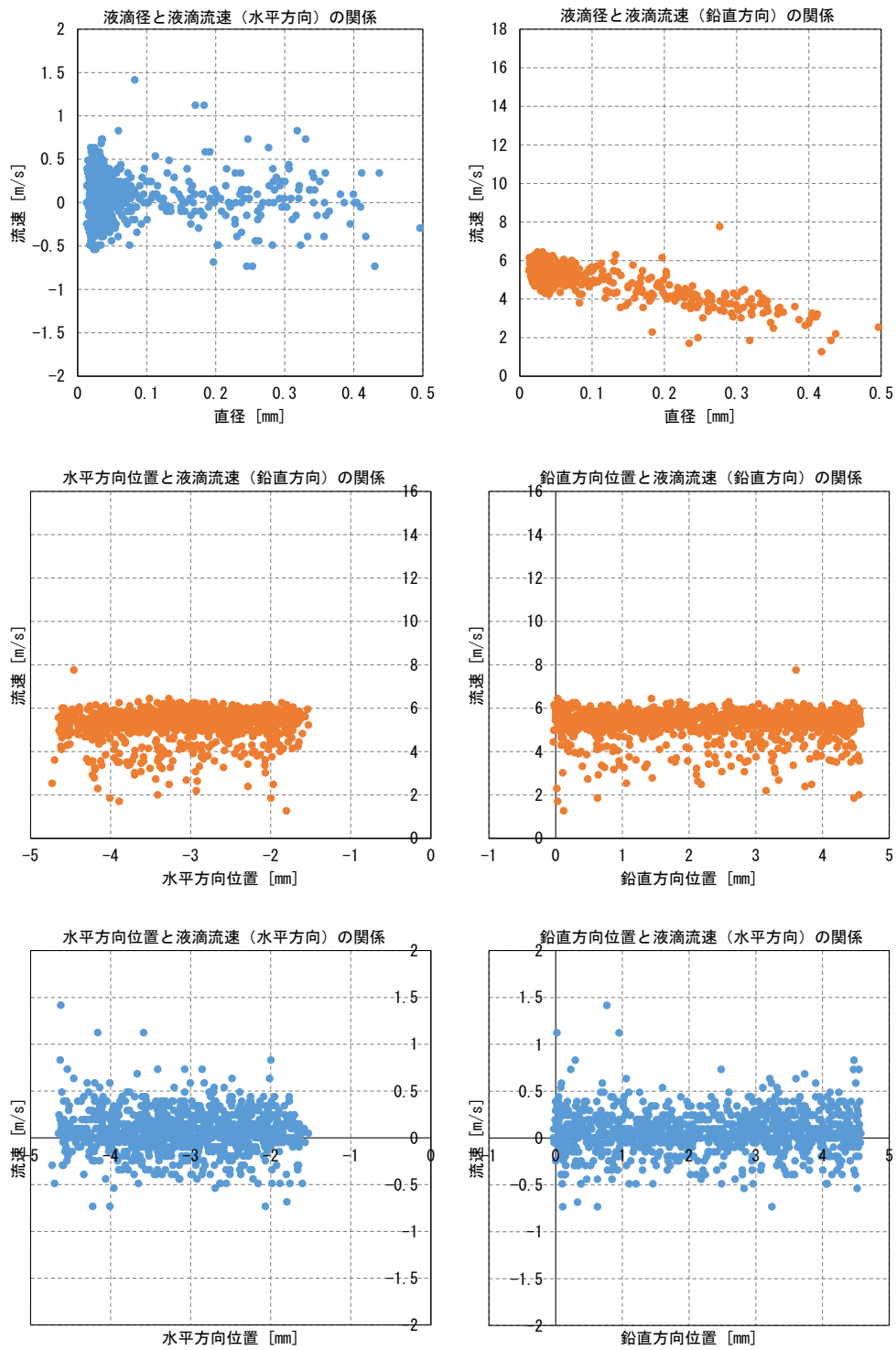


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (33/56：液滴放出量 144mg/min、空気流速平均値 4m/s、センター体系、スパーサ無)

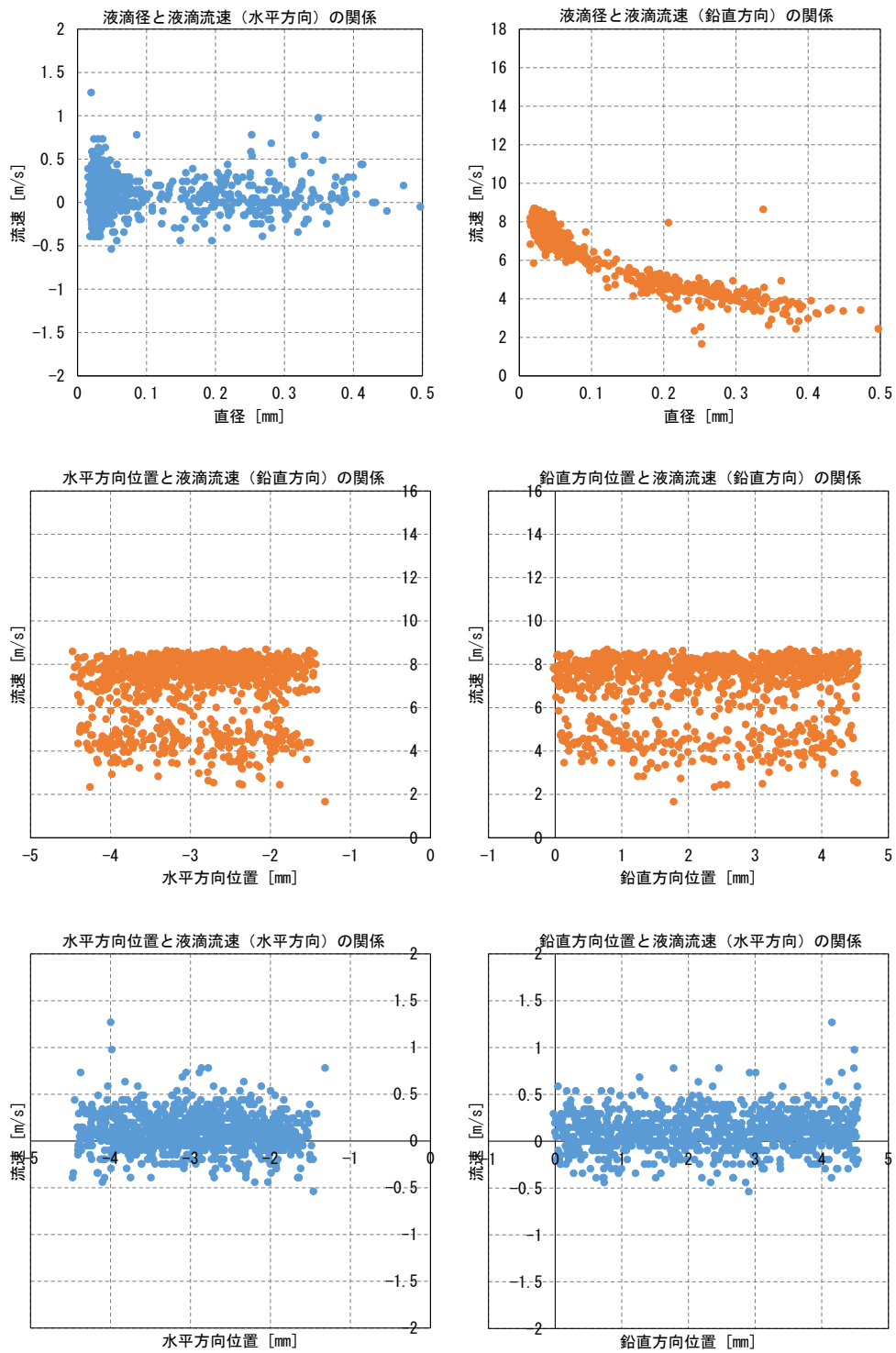


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (34/56：液滴放出量 144mg/min、空気流速平均値 4m/s、センター体系、丸セル型)

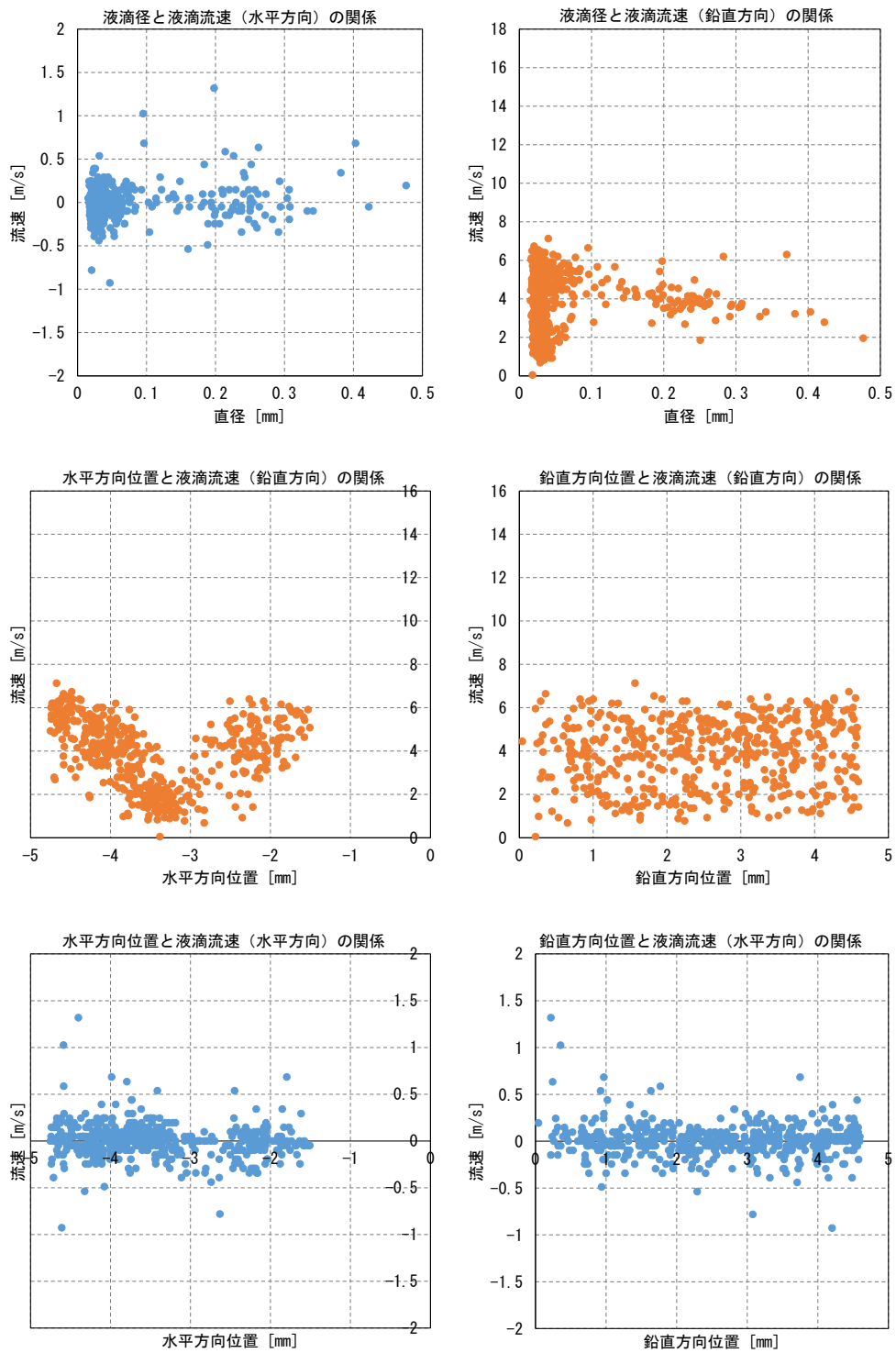


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (35/56：液滴放出量 144mg/min、空気流速平均値 4m/s、センター体系、グリッド型)

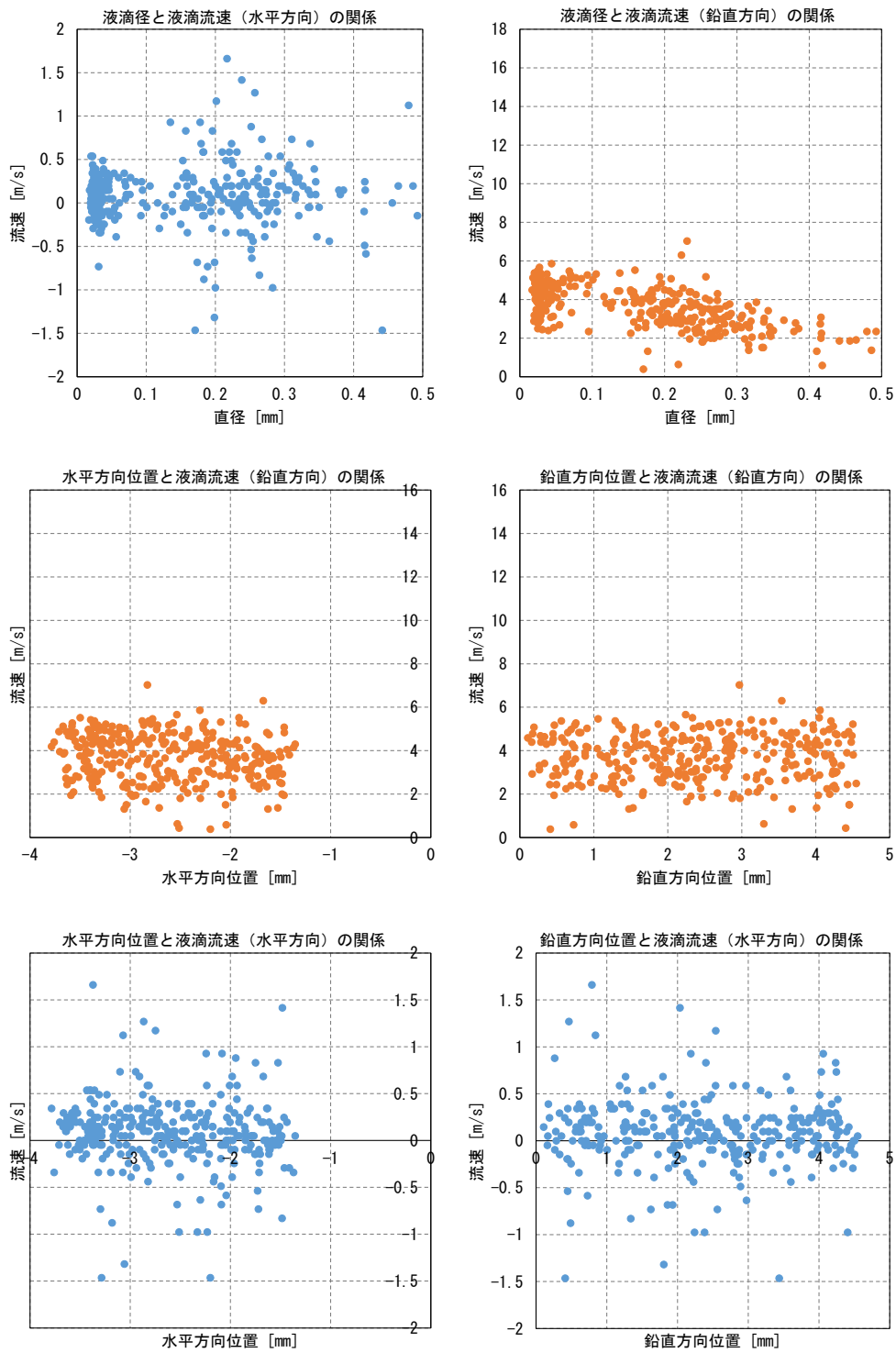


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (36/56：液滴放出量 144mg/min、空気流速平均値 4m/s、サイド体系、スパーサ無)

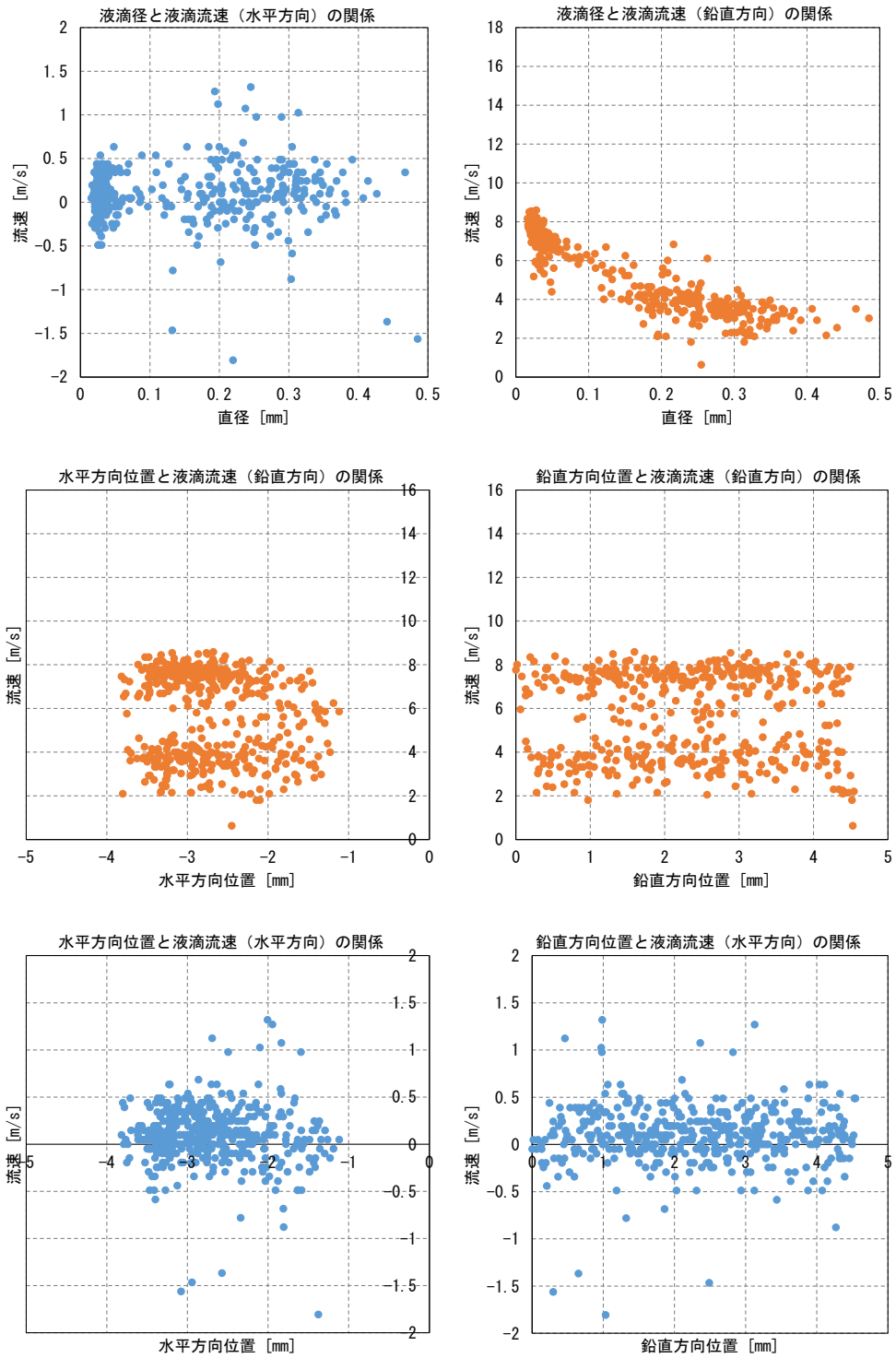


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (37/56：液滴放出量 144mg/min、空気流速平均値 4m/s、サイド体系、丸セル型)

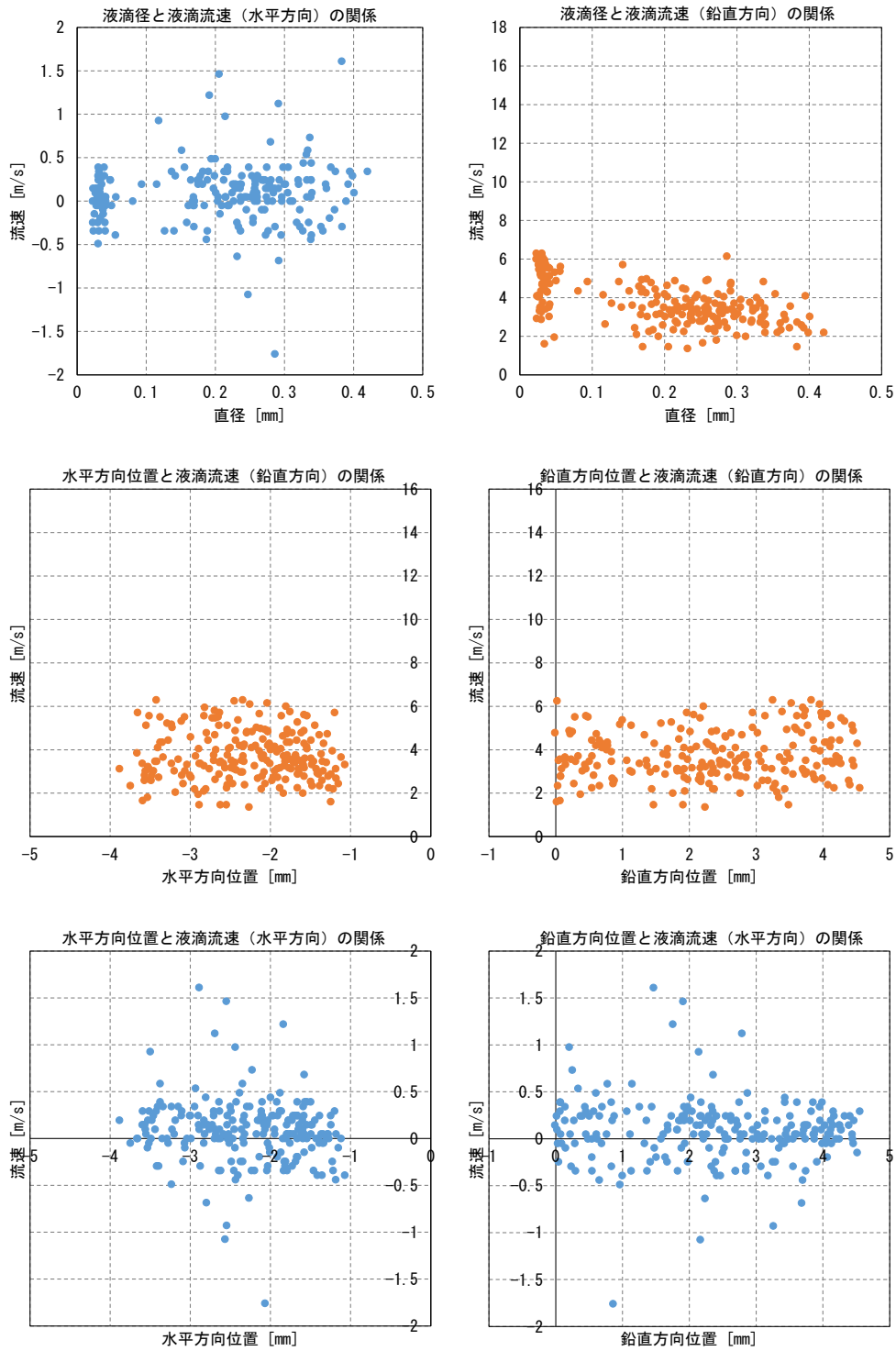


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (38/56：液滴放出量 144mg/min、空気流速平均値 4m/s、サイド体系、グリッド型)

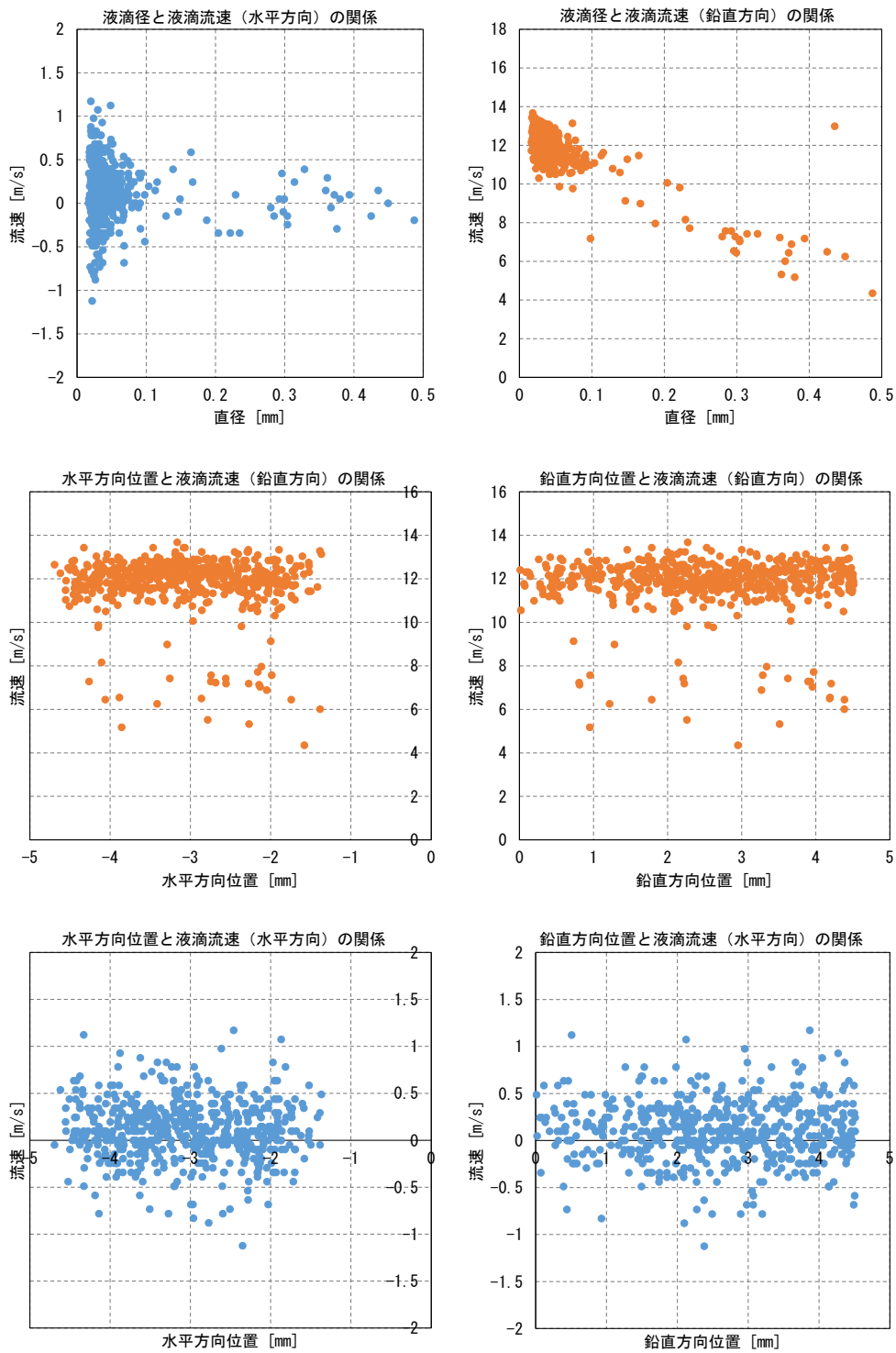


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (39/56：液滴放出量 163mg/min、空気流速平均値 10m/s、センター体系、スパーサ無)

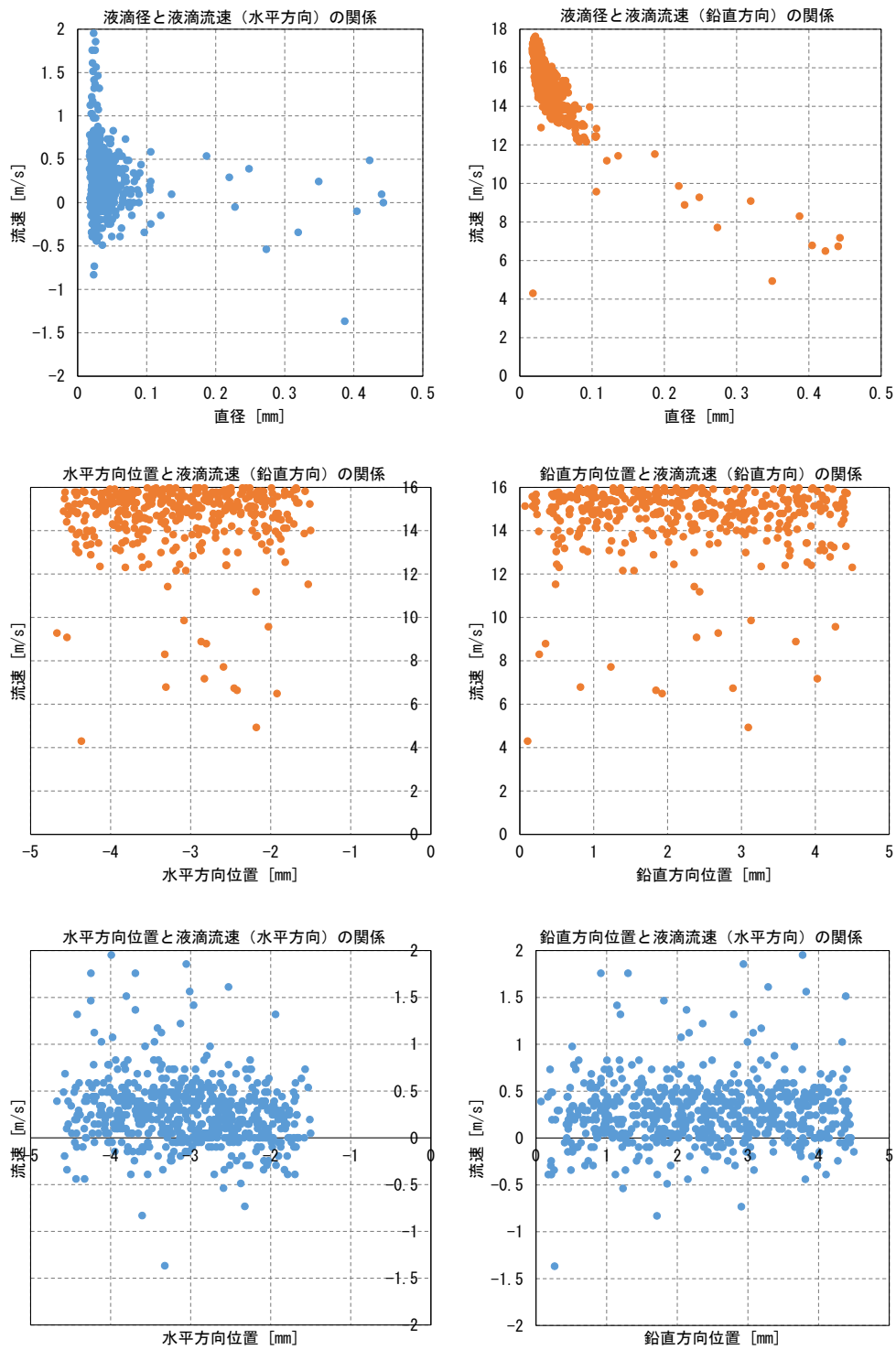


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (40/56：液滴放出量 163mg/min、空気流速平均値 10m/s、センター体系、丸セル型)

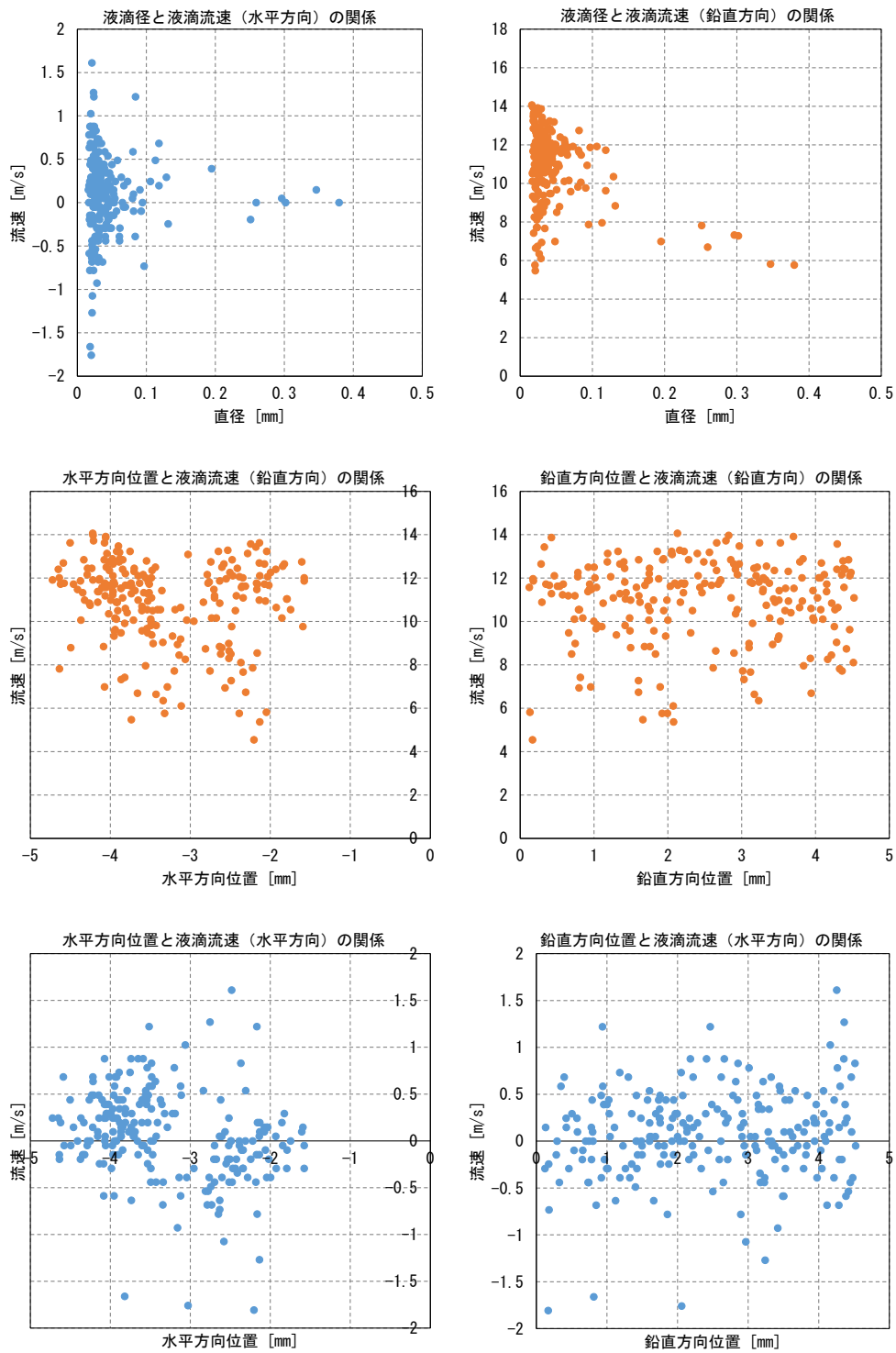


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (41/56：液滴放出量 163mg/min、空気流速平均値 10m/s、センター体系、グリッド型)

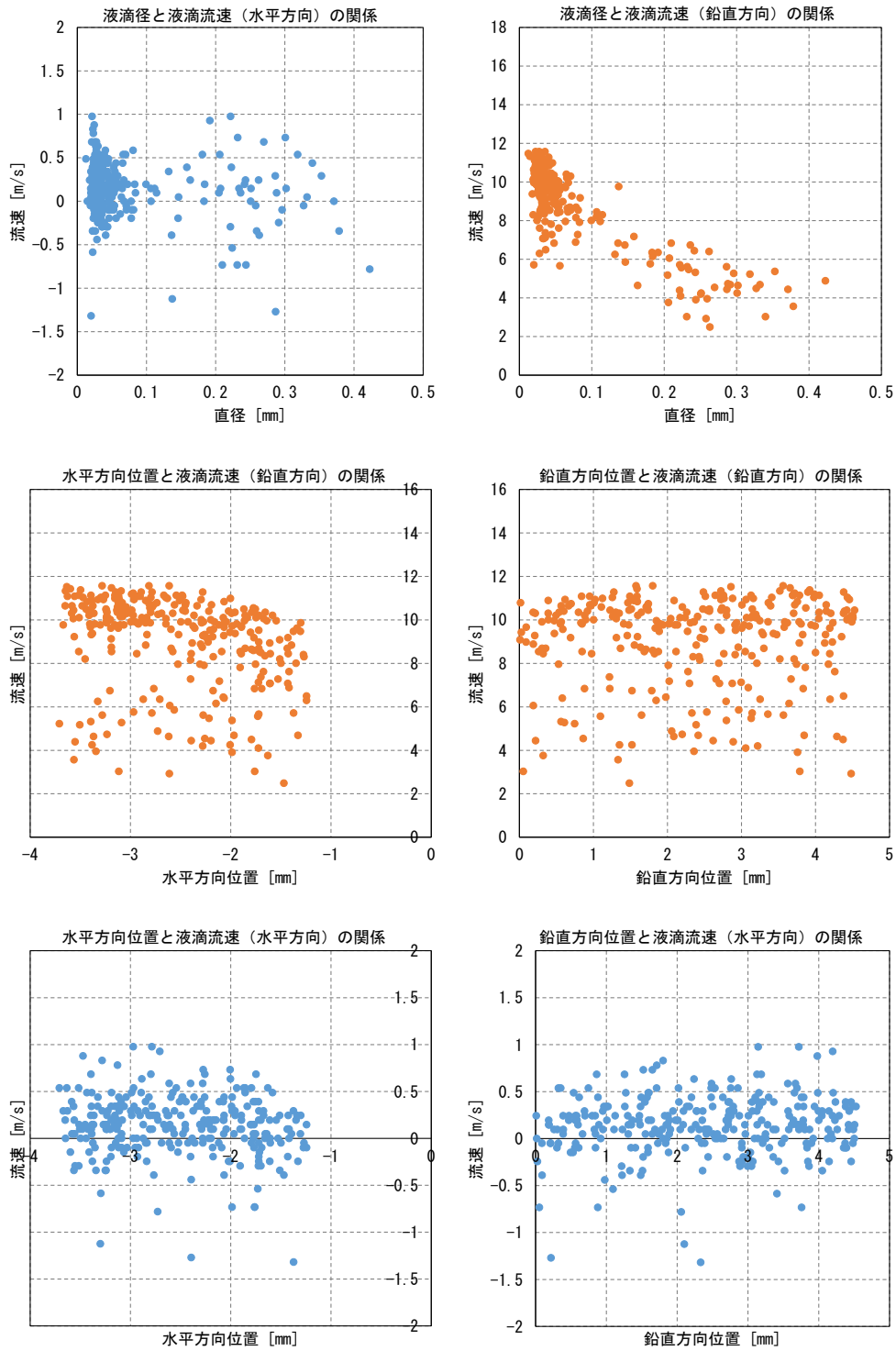


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (42/56：液滴放出量 163mg/min、空気流速平均値 10m/s、サイド体系、スパーサ無)

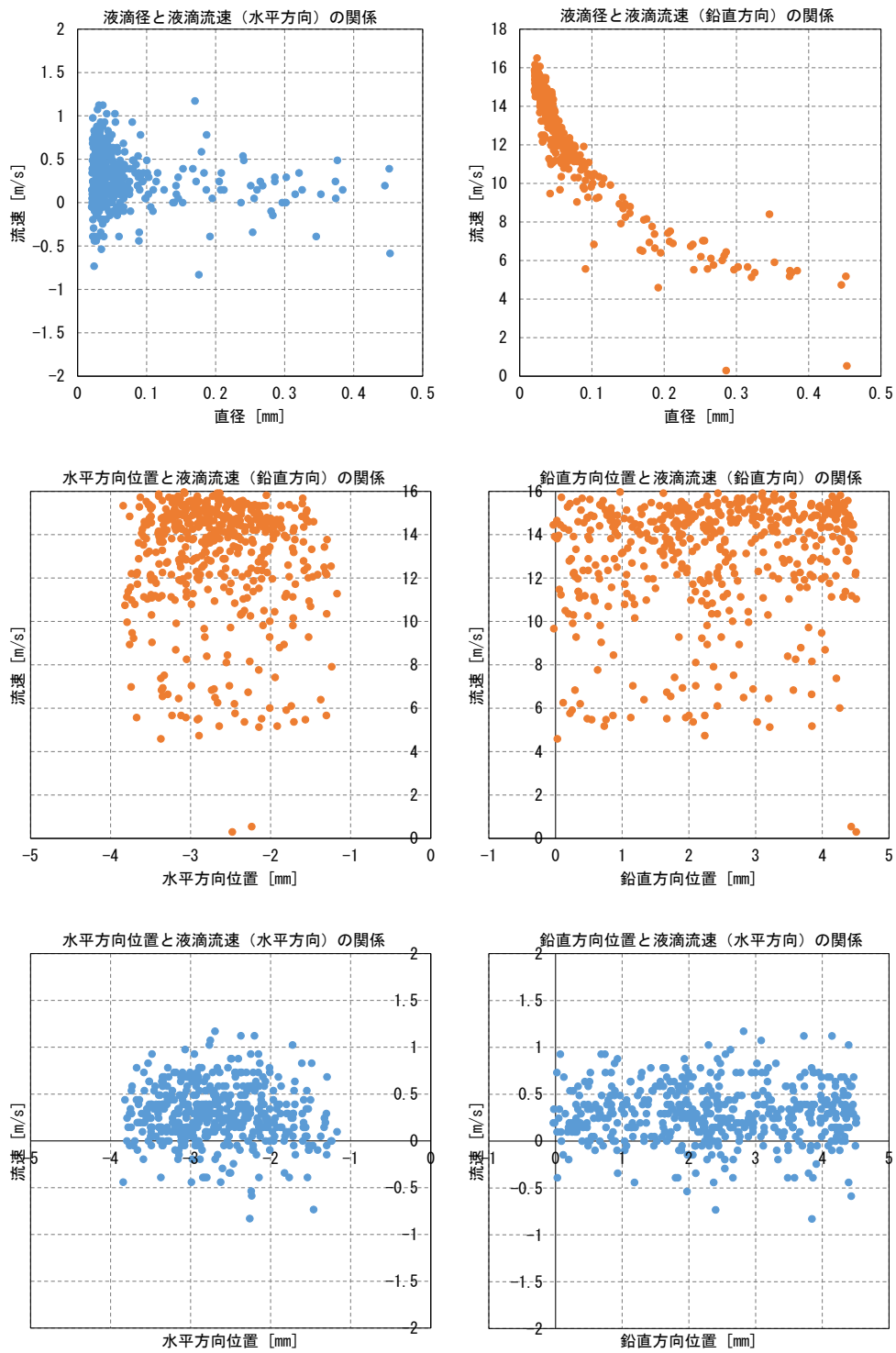


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (43/56：液滴放出量 163mg/min、空気流速平均値 10m/s、サイド体系、丸セル型)

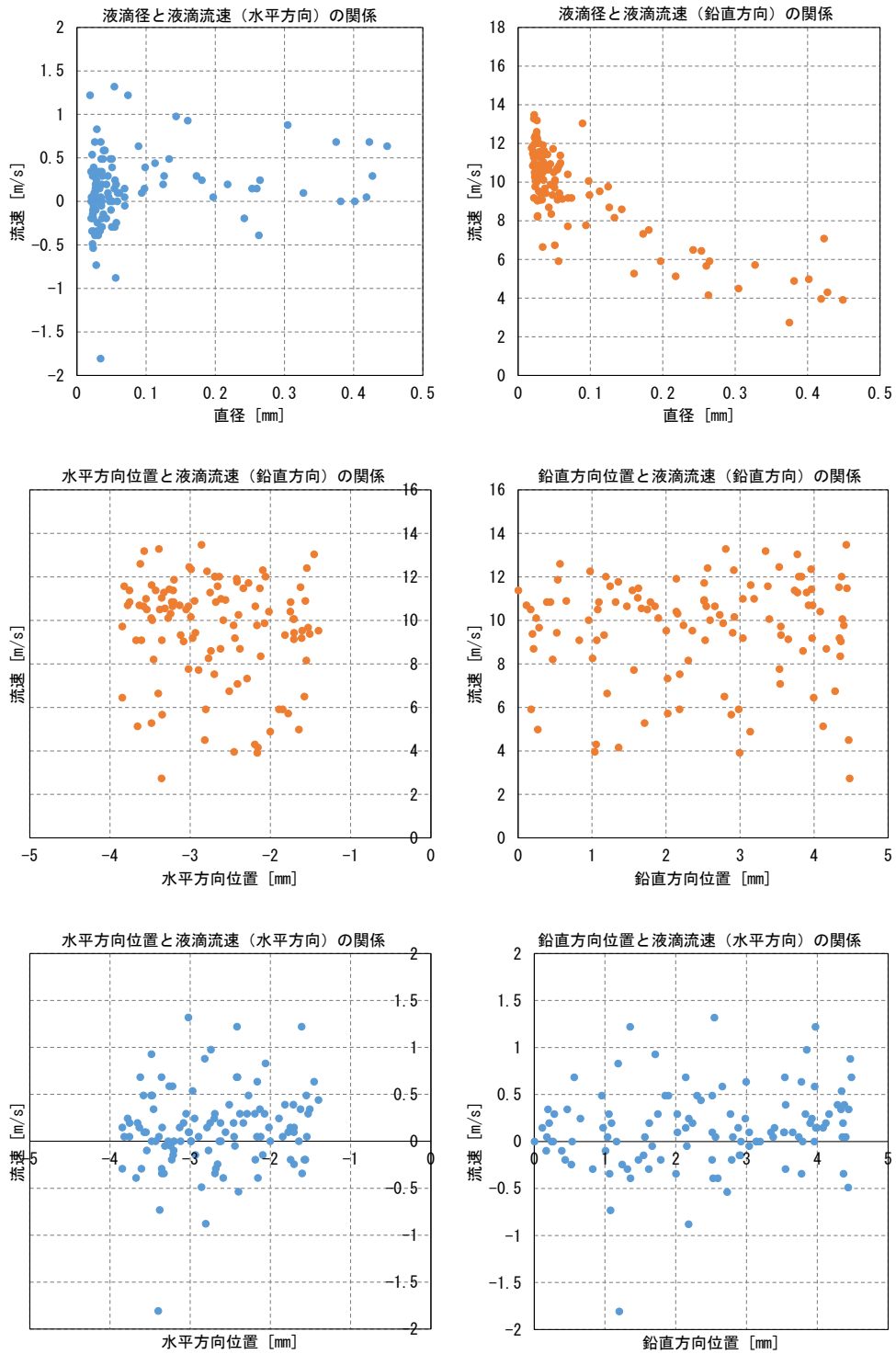


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (44/56：液滴放出量 163mg/min、空気流速平均値 10m/s、サイド体系、グリッド型)

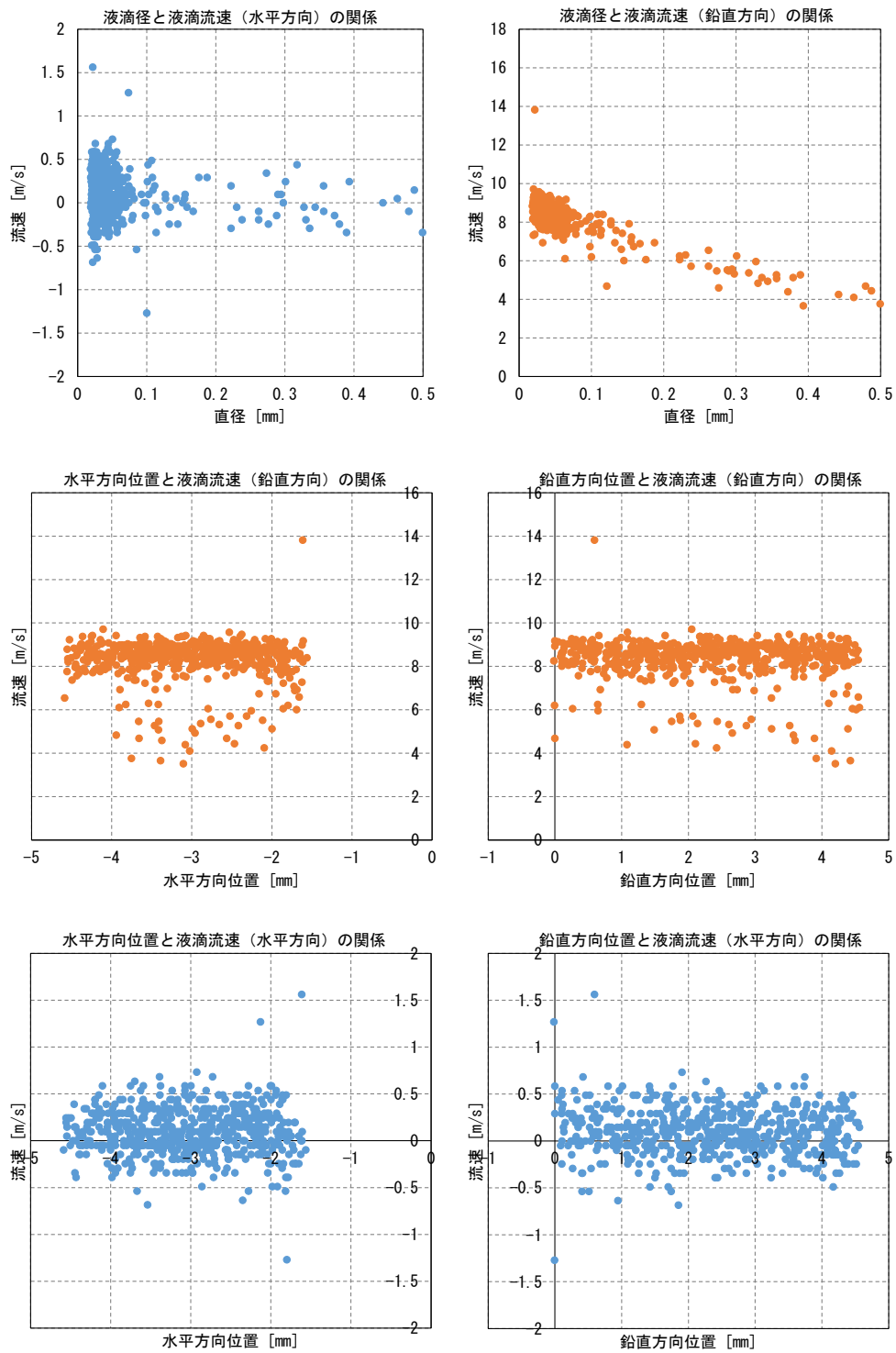


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (45/56：液滴放出量 163mg/min、空気流速平均値 7m/s、センター体系、スぺーサ無)

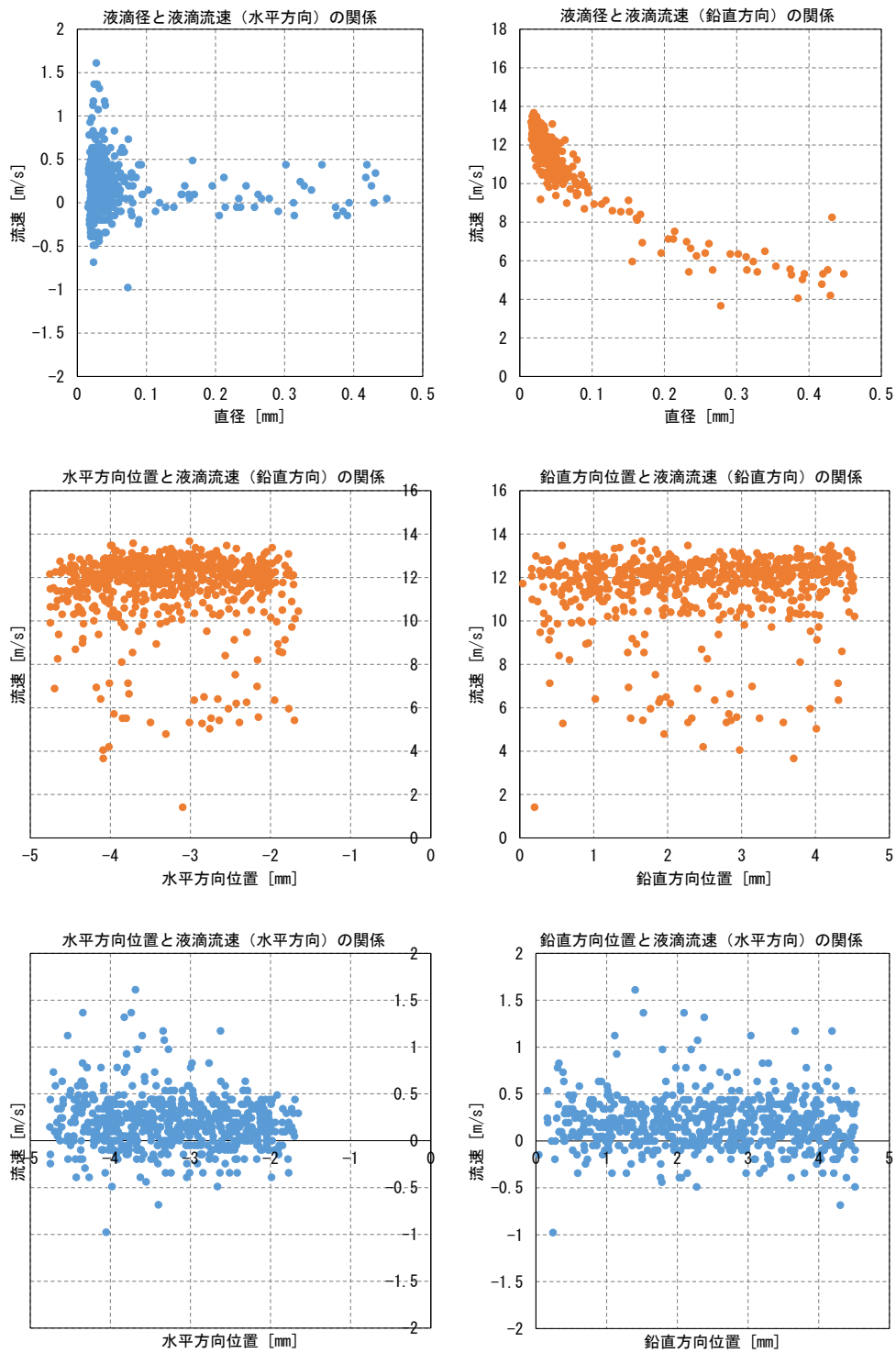


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (46/56：液滴放出量 163mg/min、空気流速平均値 7m/s、センター体系、丸セル型)

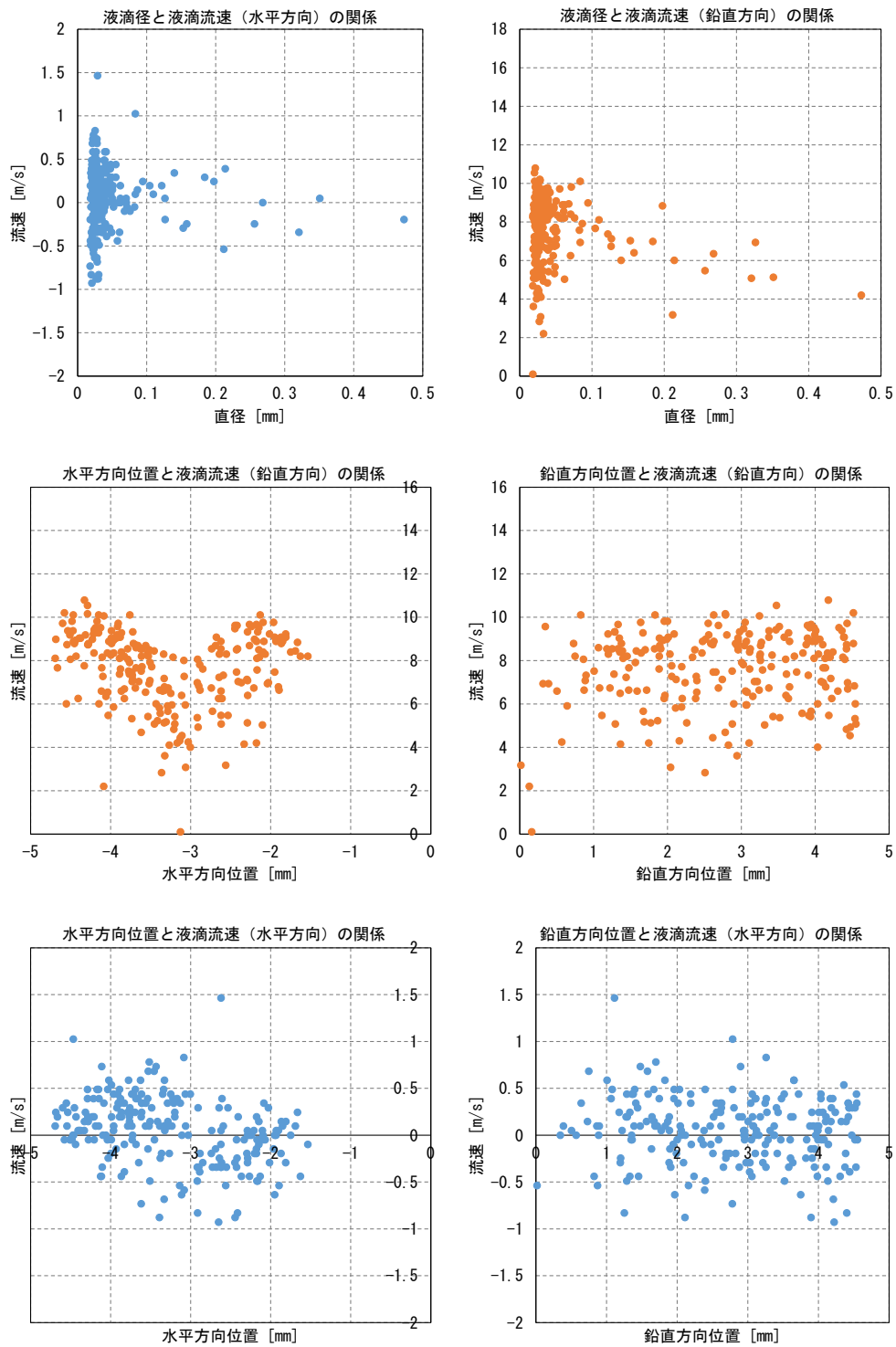


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (47/56：液滴放出量 163mg/min、空気流速平均値 7m/s、センター体系、グリッド型)

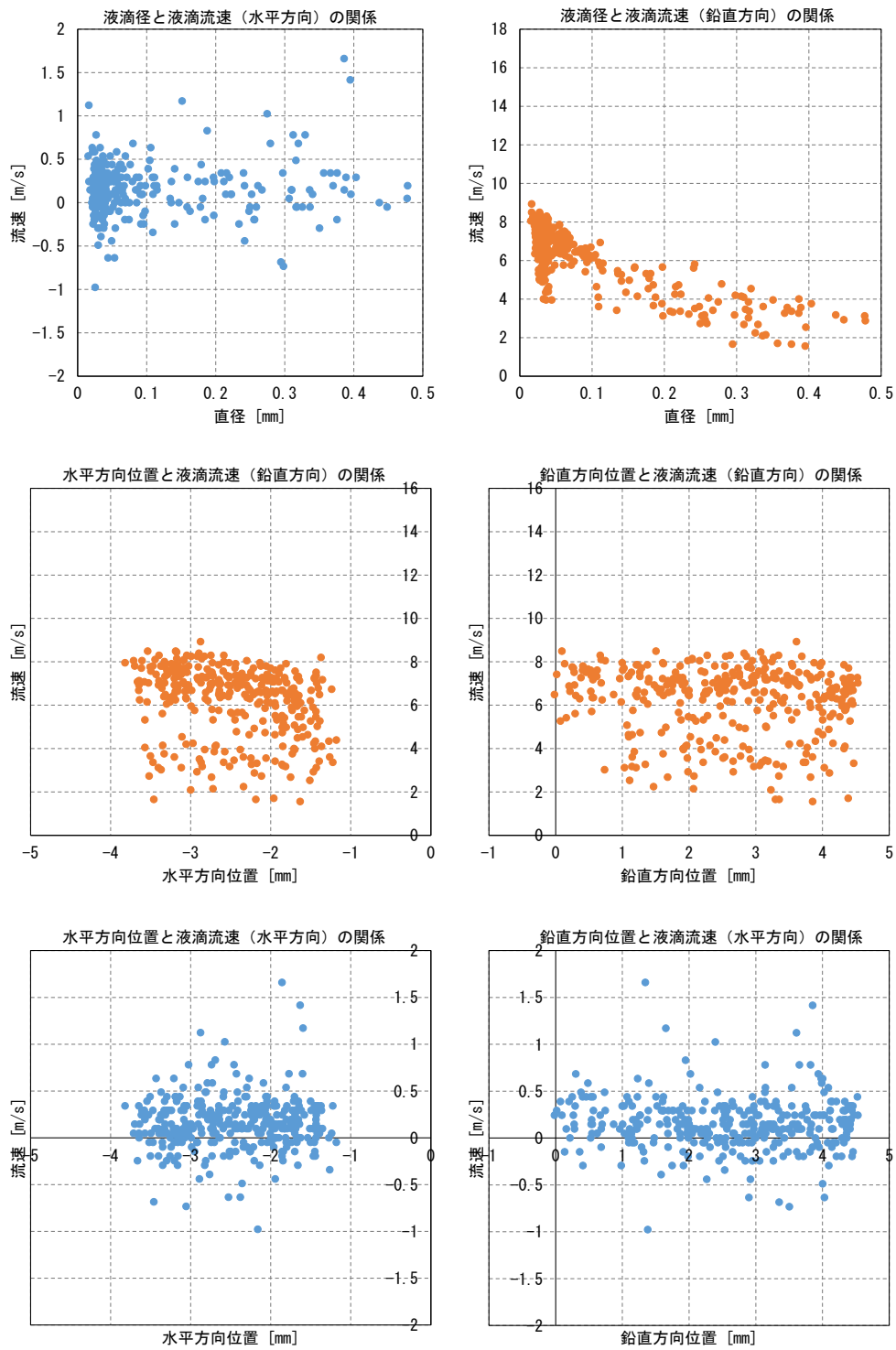


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (48/56：液滴放出量 163mg/min、空気流速平均値 7m/s、サイド体系、スぺーサ無)

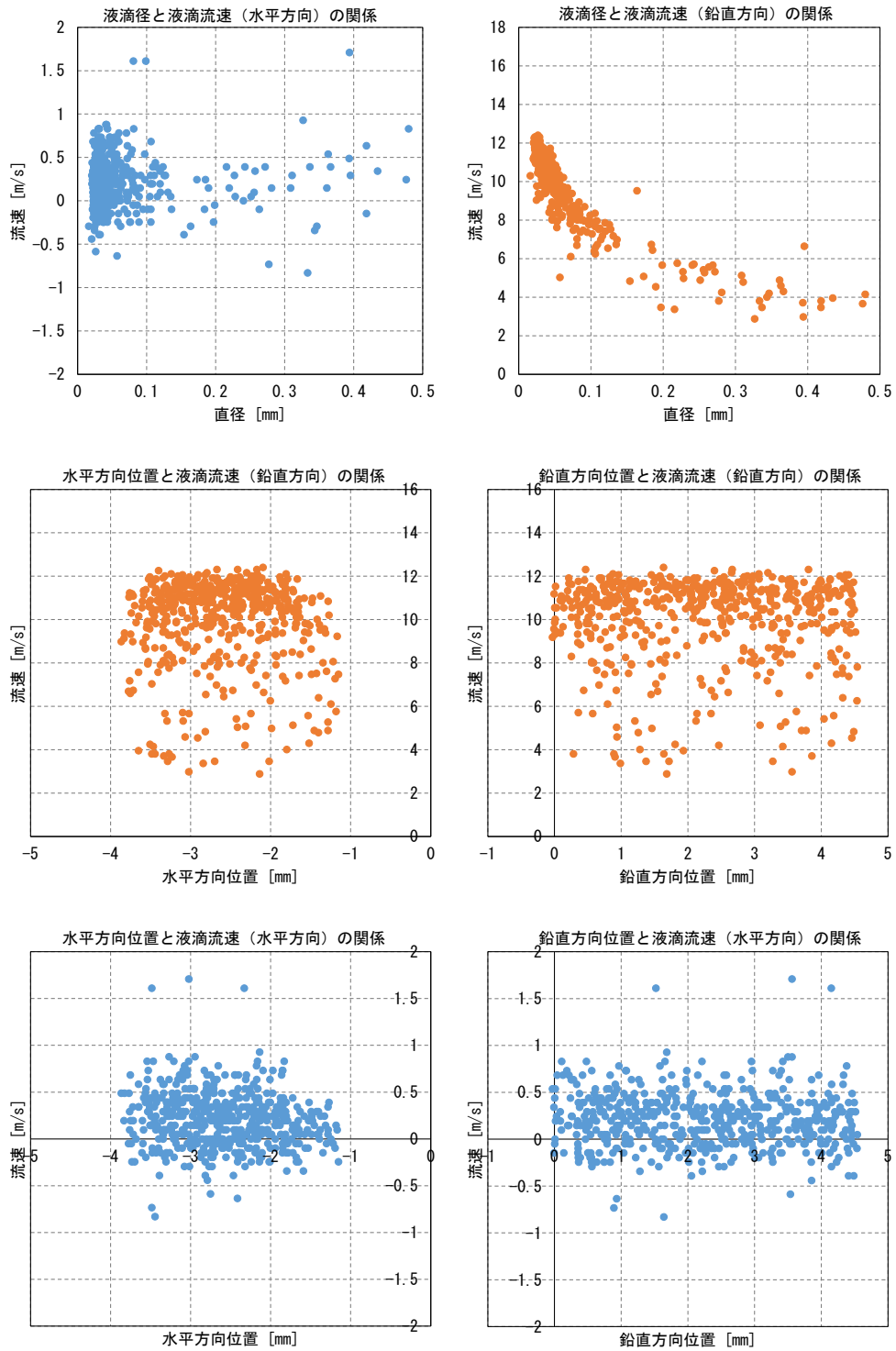


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (49/56：液滴放出量 163mg/min、空気流速平均値 7m/s、サイド体系、丸セル型)

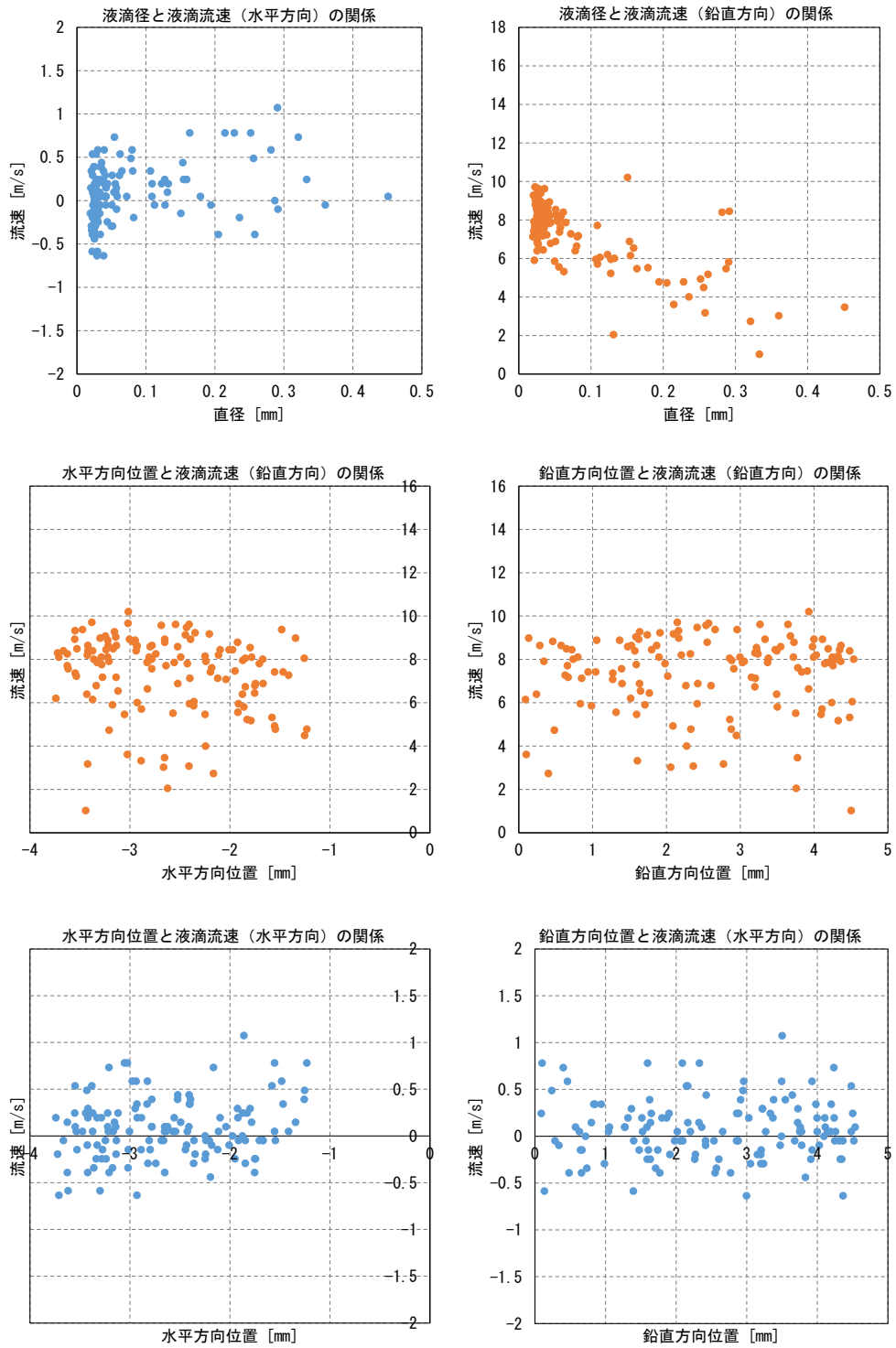


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (50/56：液滴放出量 163mg/min、空気流速平均値 7m/s、サイド体系、グリッド型)

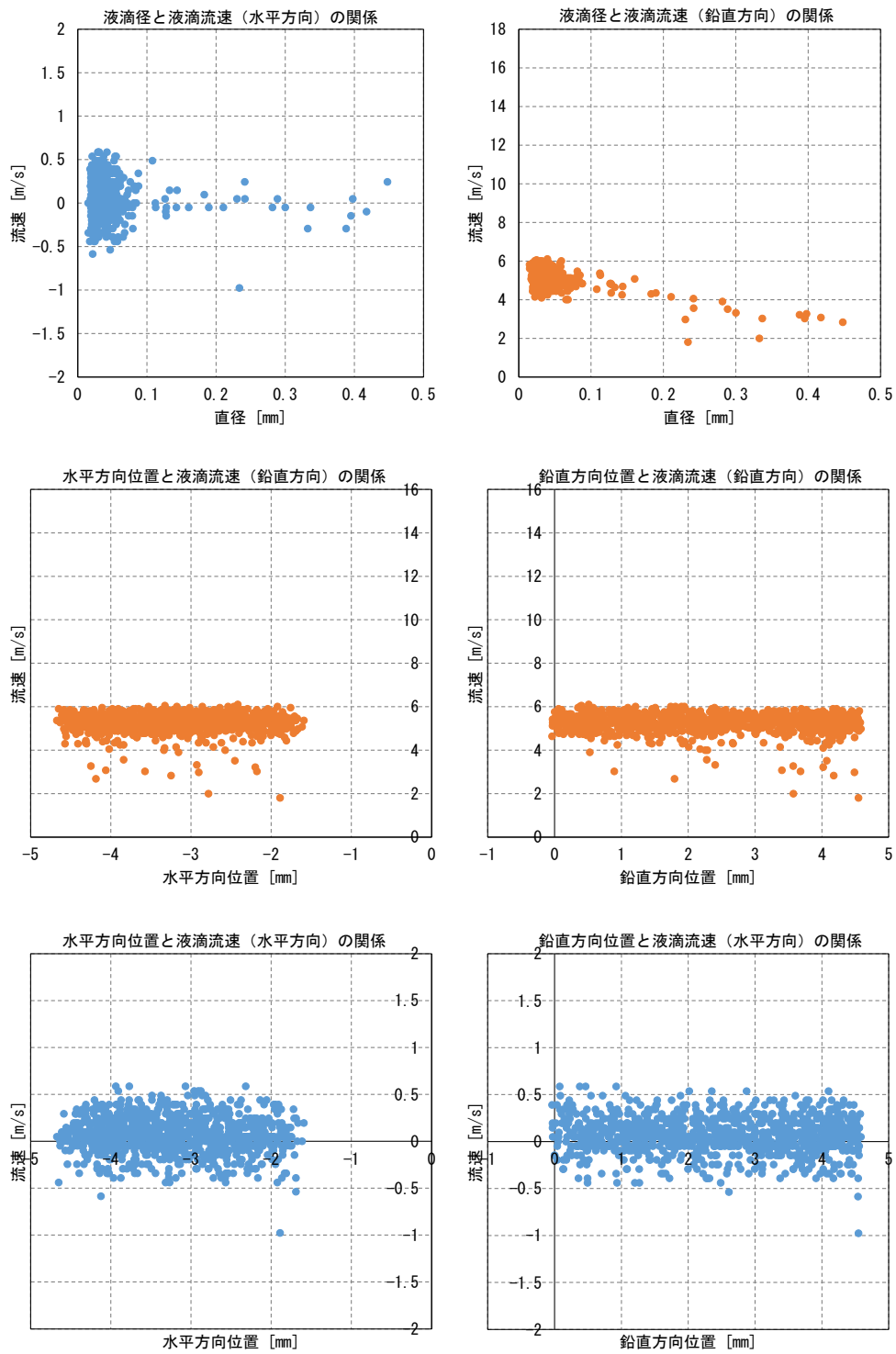


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (51/56：液滴放出量 163mg/min、空気流速平均値 4m/s、センター体系、スパーサ無)

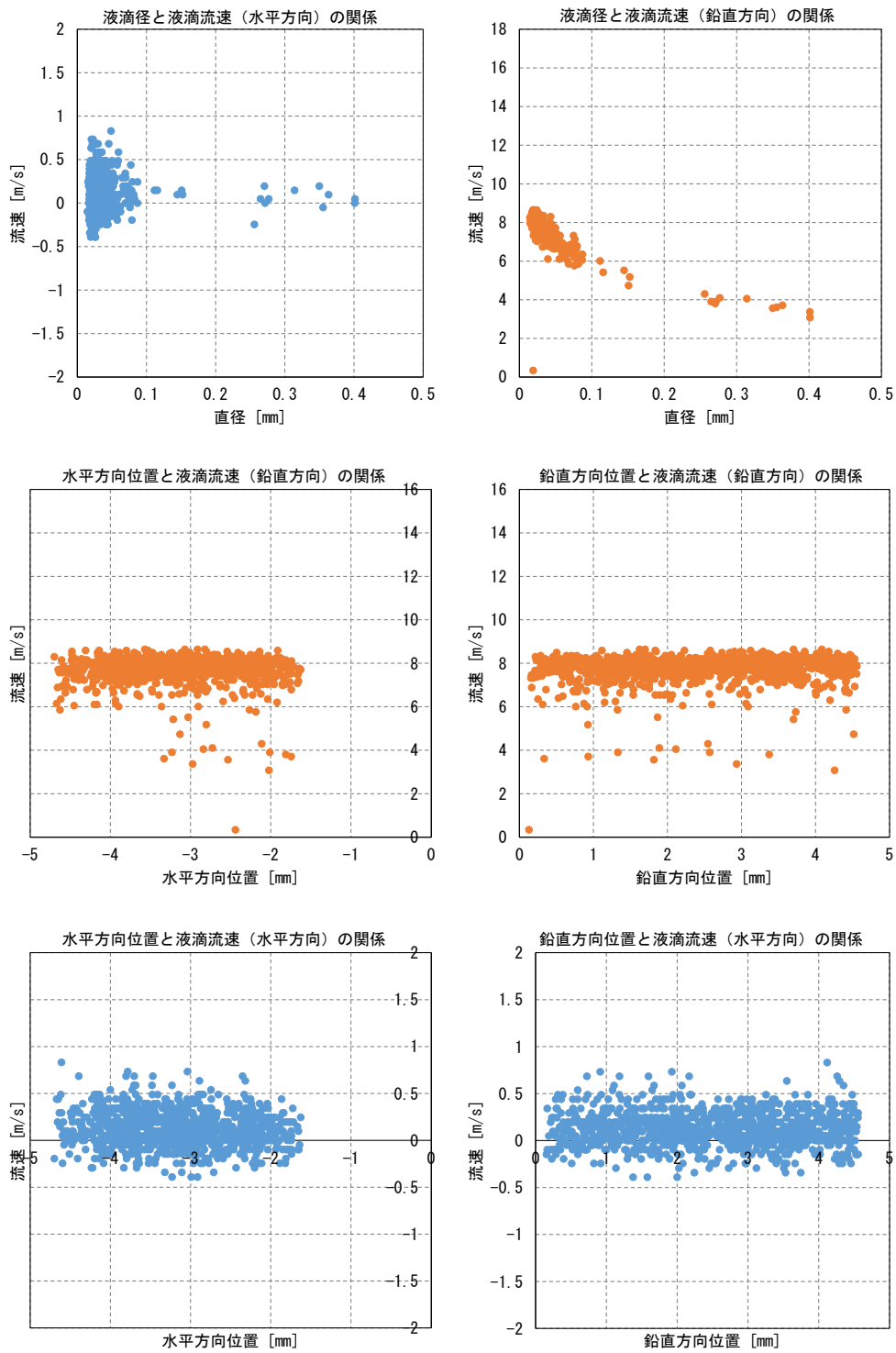


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (52/56：液滴放出量 163mg/min、空気流速平均値 4m/s、センター体系、丸セル型)

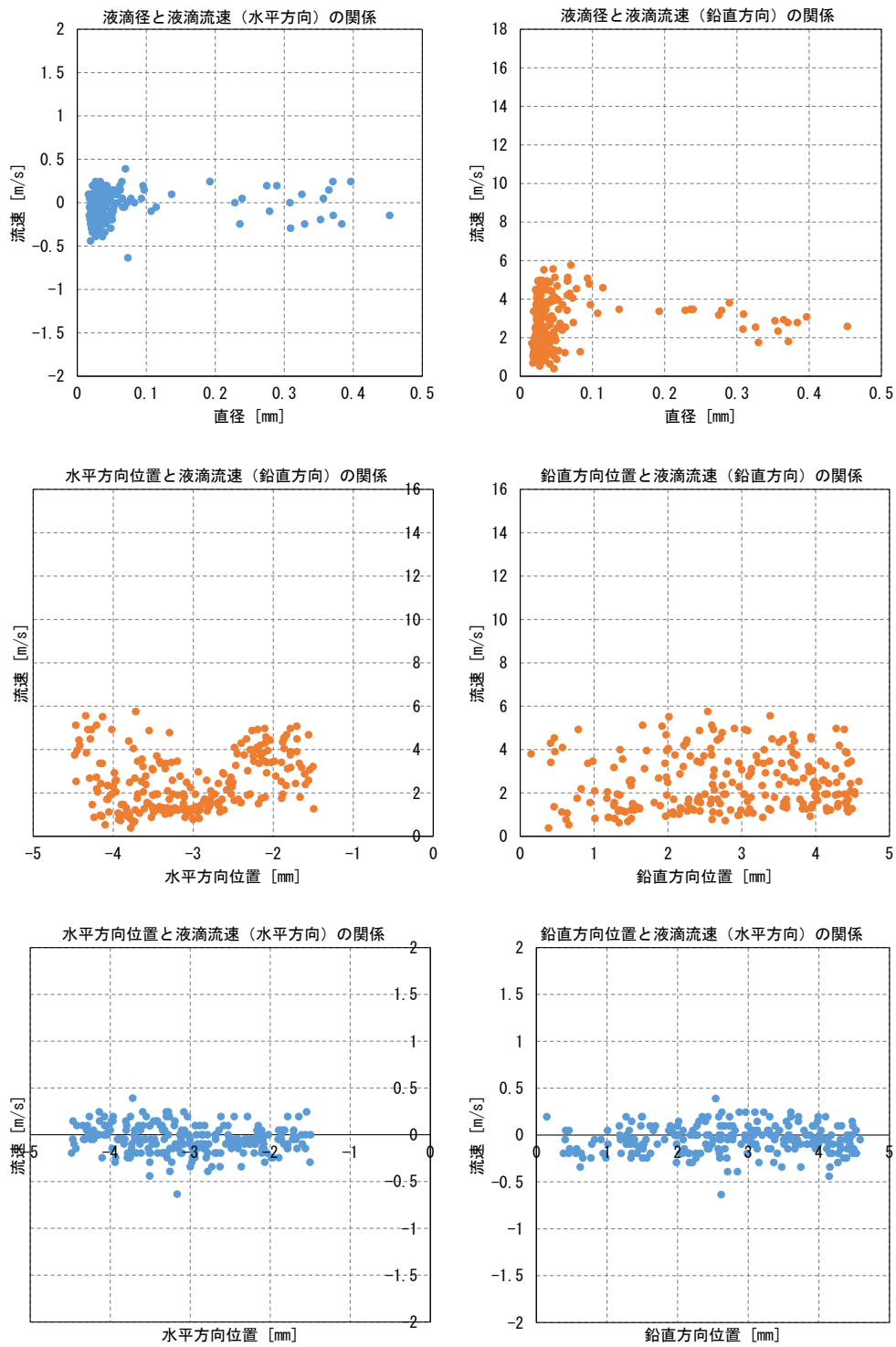


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (53/56：液滴放出量 163mg/min、空気流速平均値 4m/s、センター体系、グリッド型)

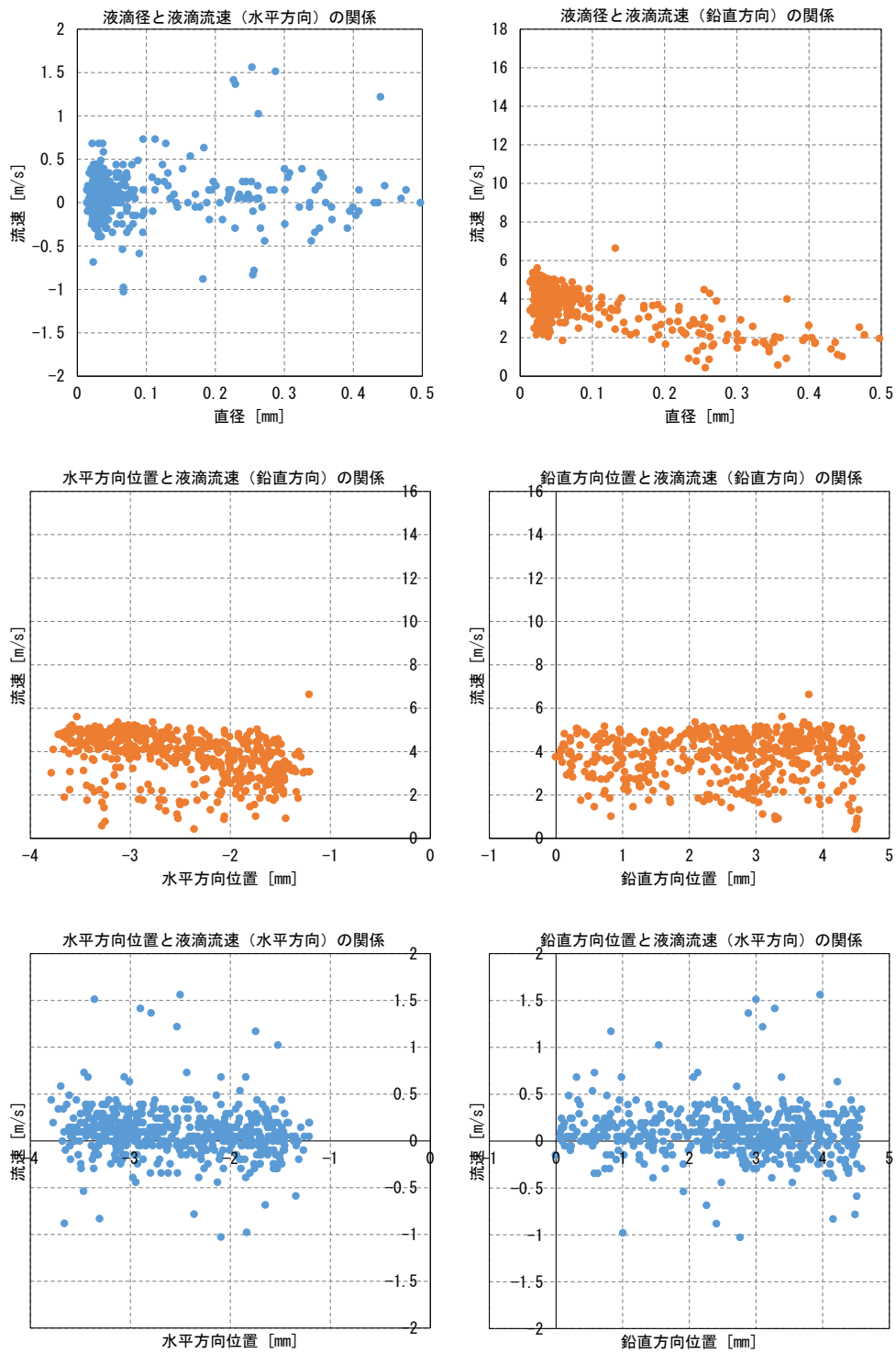


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (54/56：液滴放出量 163mg/min、空気流速平均値 4m/s、サイド体系、スパーサ無)

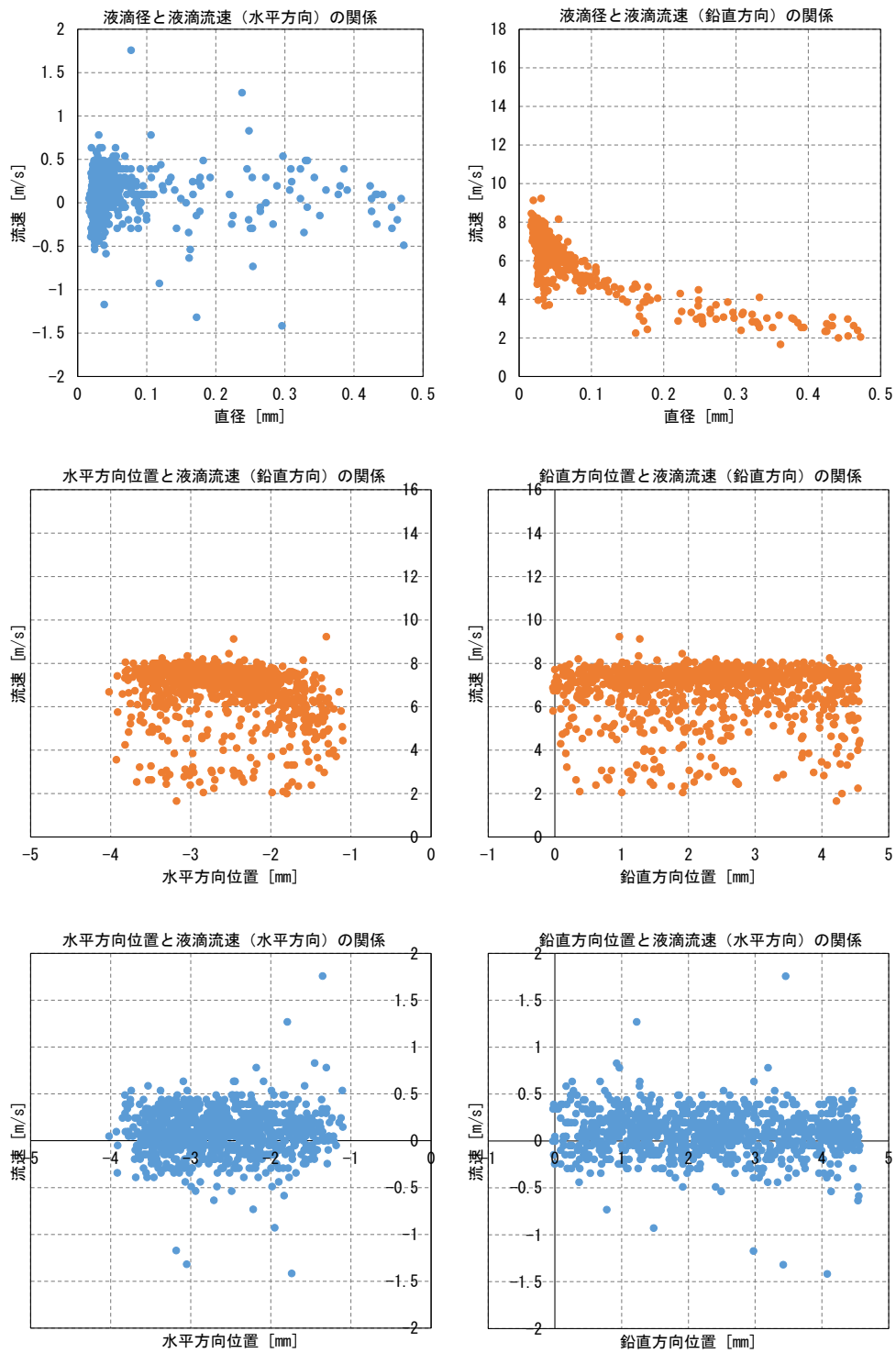


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (55/56：液滴放出量 163mg/min、空気流速平均値 4m/s、サイド体系、丸セル型)

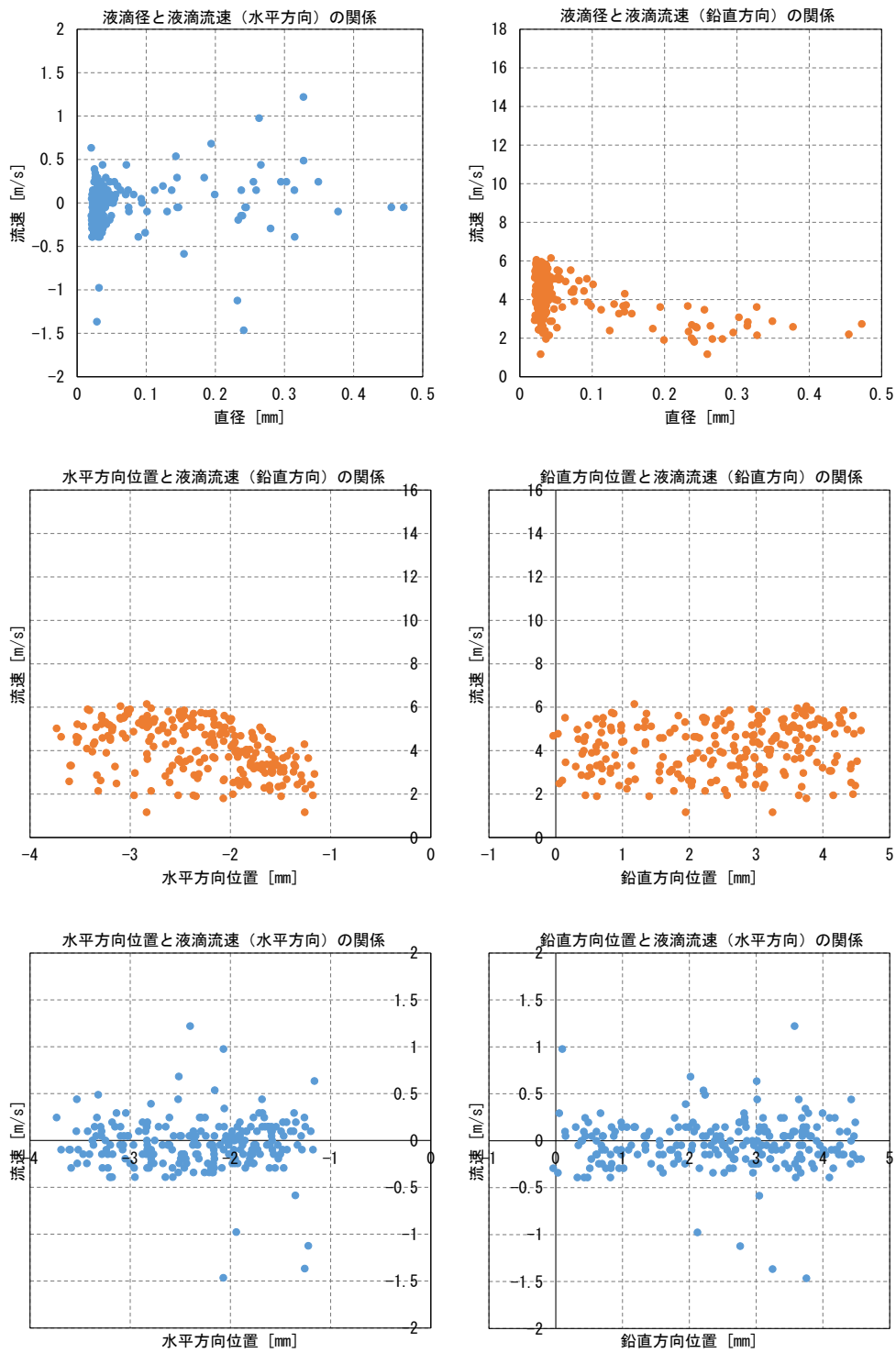


図 3-5 液滴運動計測：液滴径、速度、観測位置との関係
 (56/56：液滴放出量 163mg/min、空気流速平均値 4m/s、サイド体系、グリッド型)

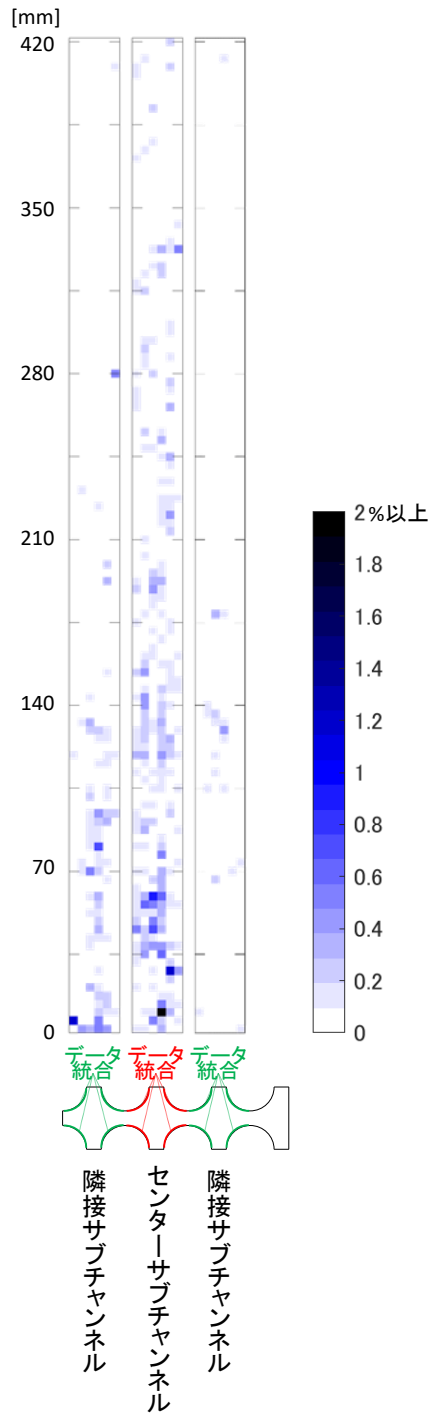


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (1/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 10m/s、センター体系、スプレーサ無)

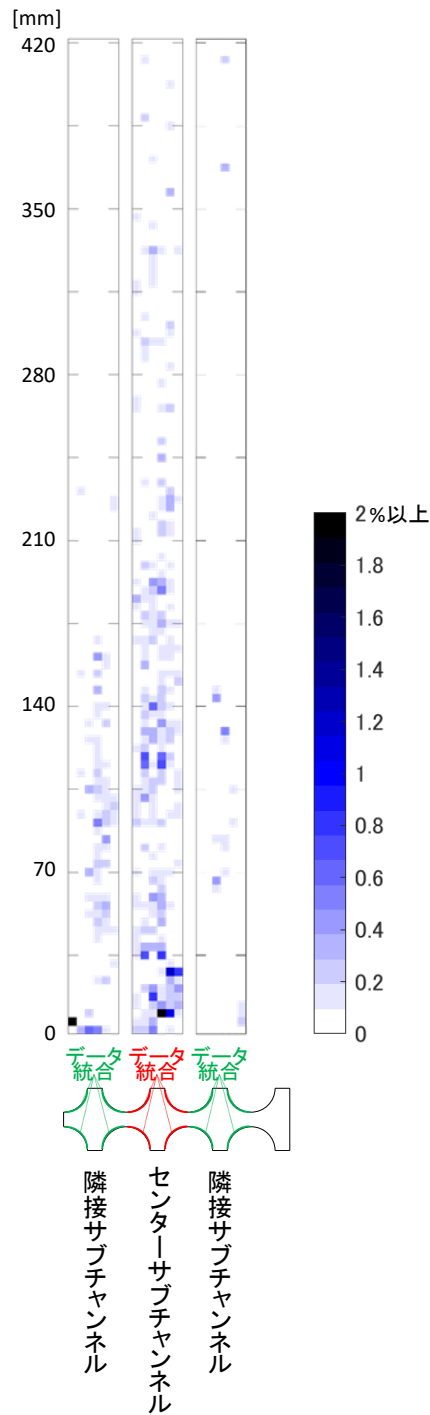


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (2/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 10m/s、センター体系、丸セル型)

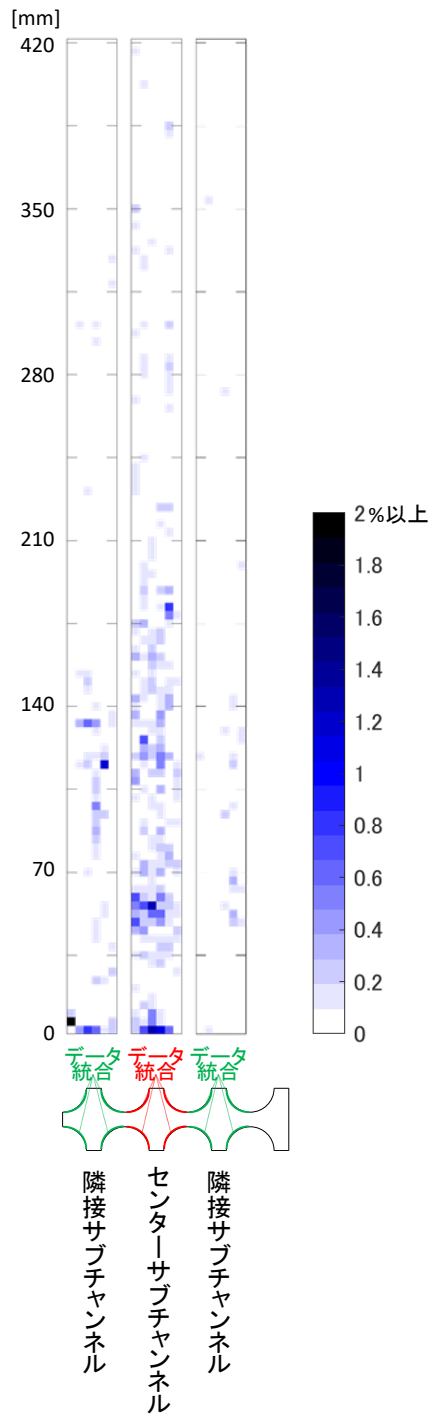


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (3/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 10m/s、センター体系、グリッド型)

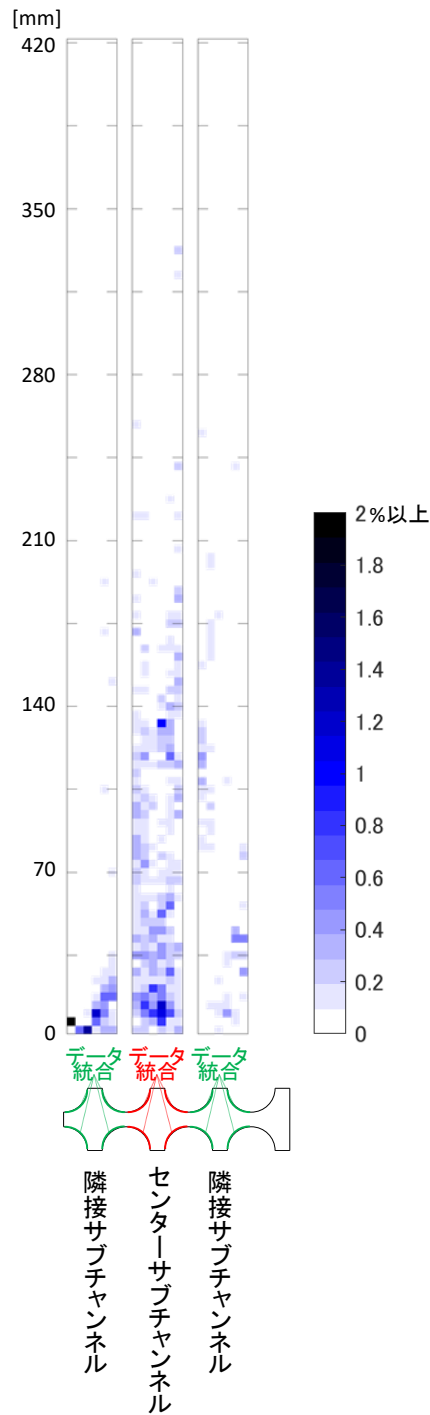


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (4/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 10m/s、センター体系、グリッド型+旋
 回羽)

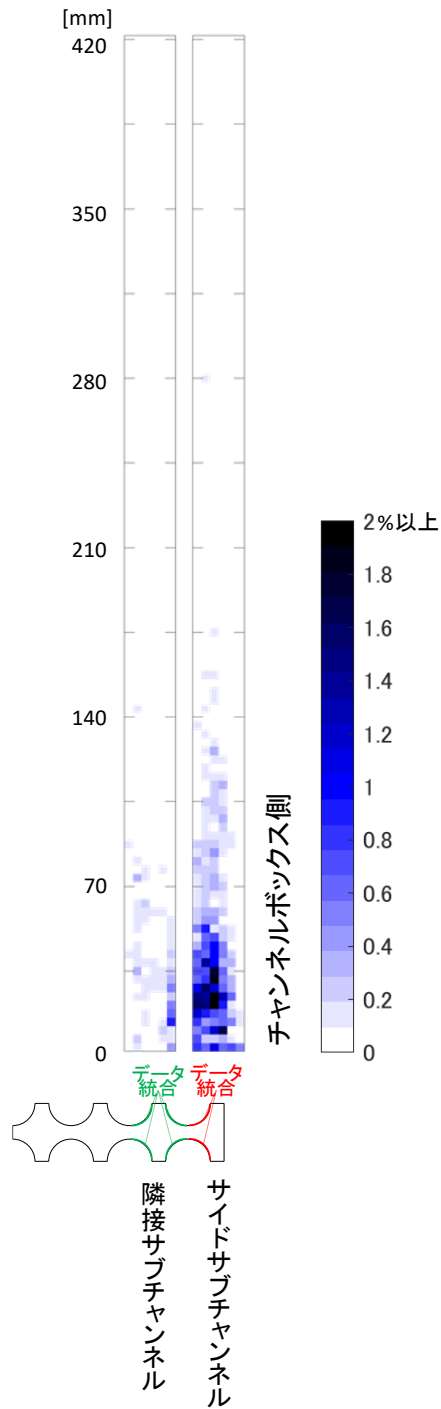


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (5/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 10m/s、サイド体系、スプレーサ無)

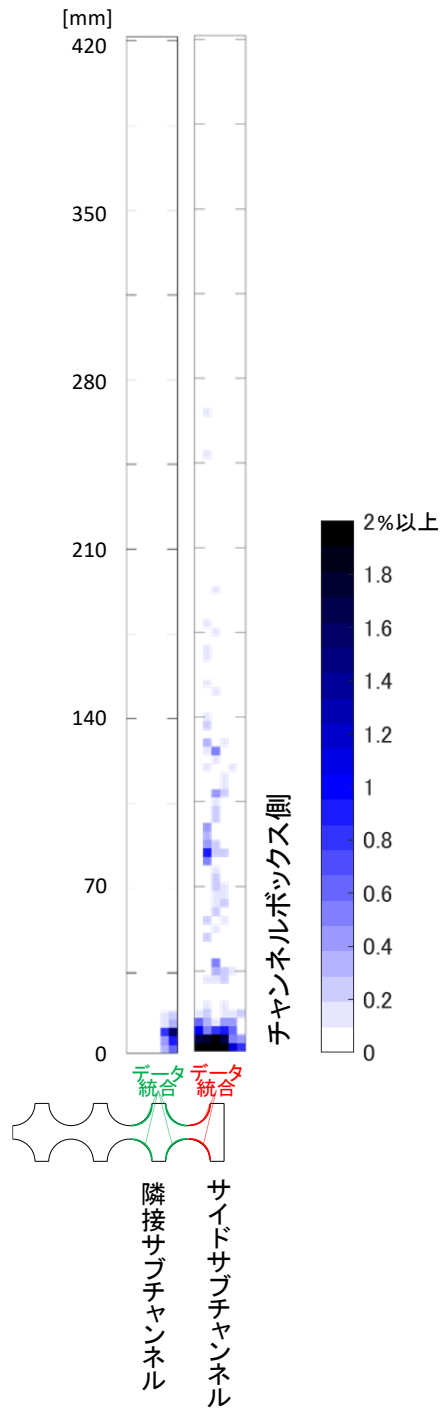


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (6/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 10m/s、サイド体系、丸セル型)

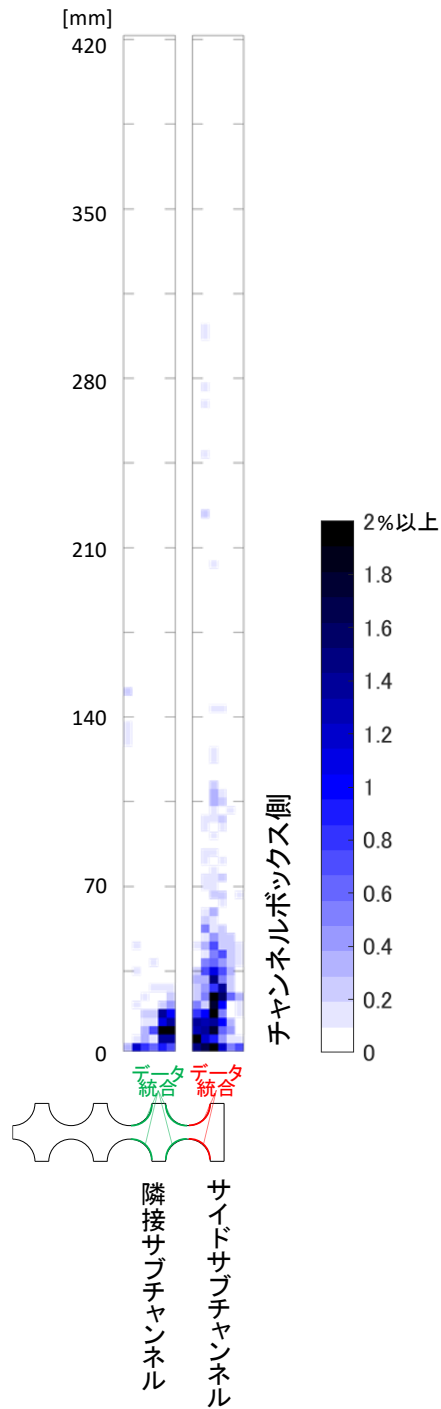


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (7/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 10m/s、サイド体系、グリッド型)

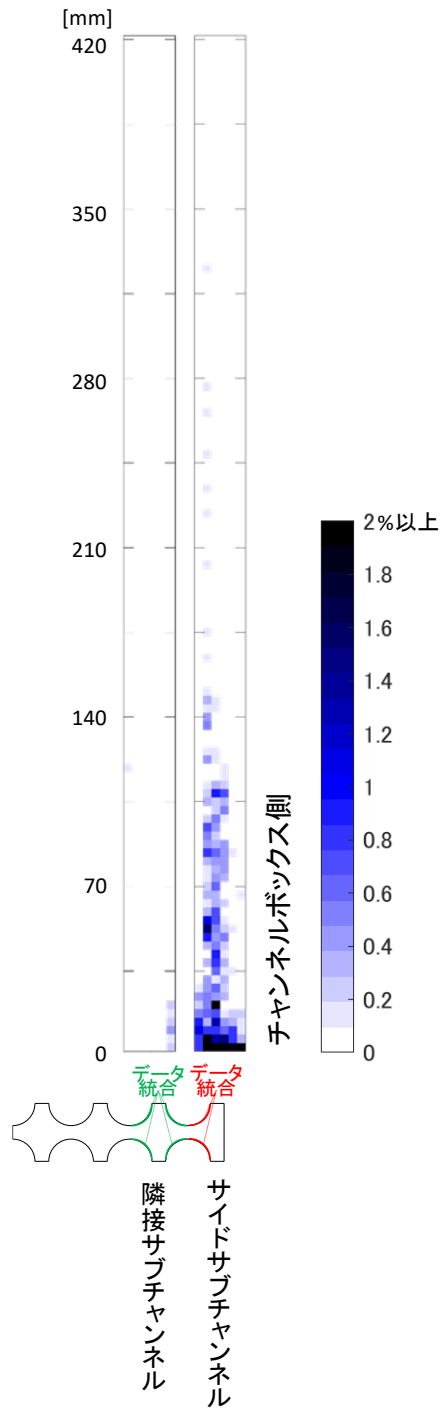


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
(8/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 10m/s、サイド体系、丸セル型＋フロータブ)

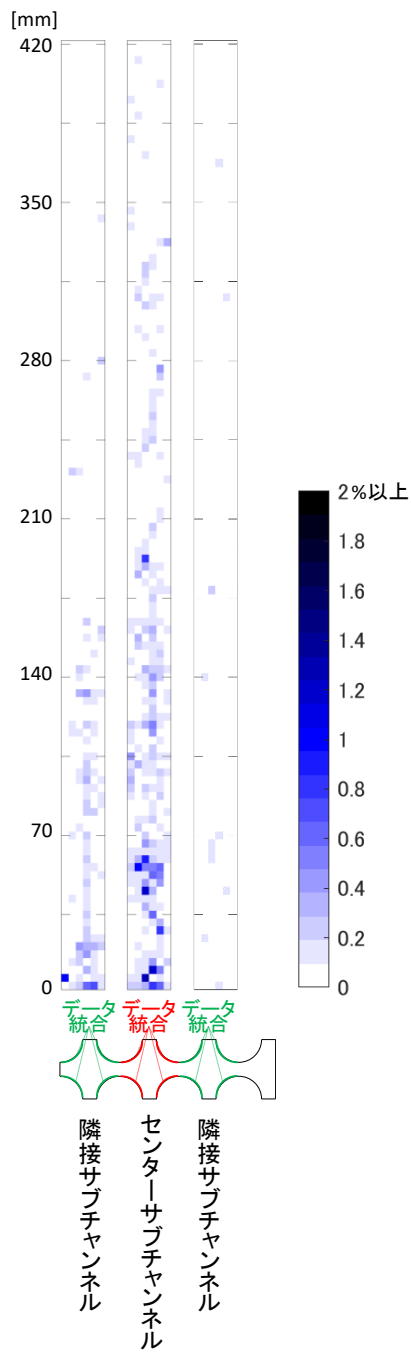


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (9/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 7m/s、センター体系、スパーサ無)

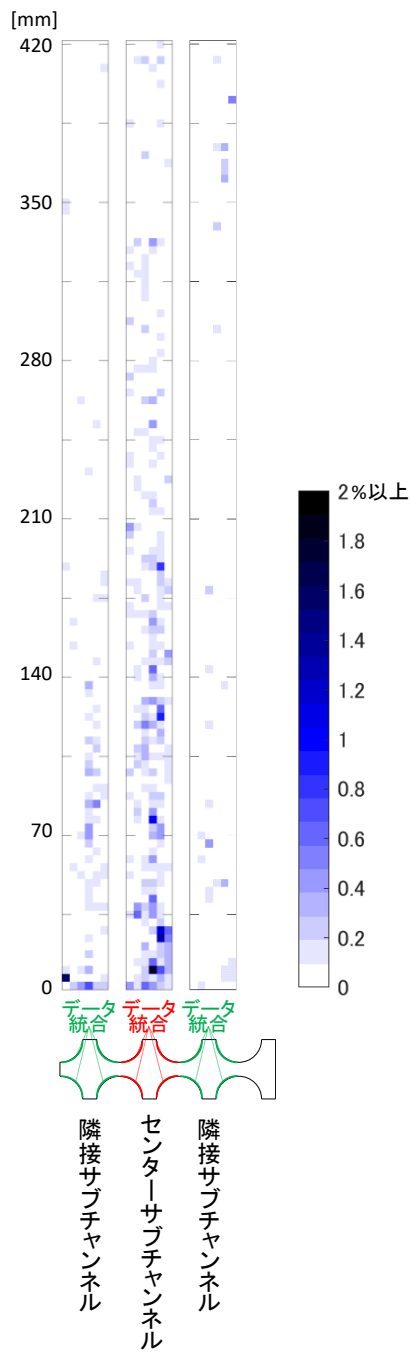


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (10/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 7m/s、センター体系、丸セル型)

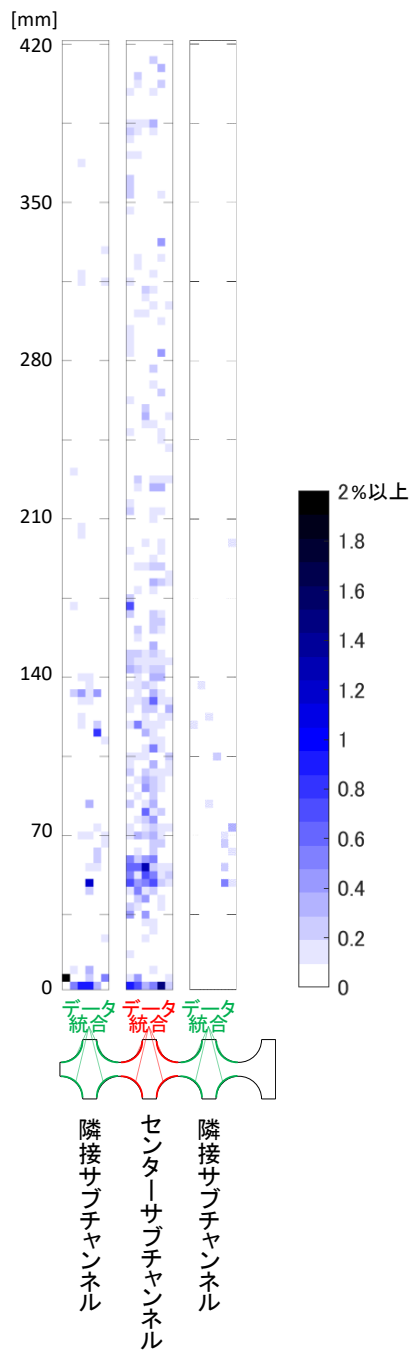


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (11/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 7m/s、センター体系、グリッド型)

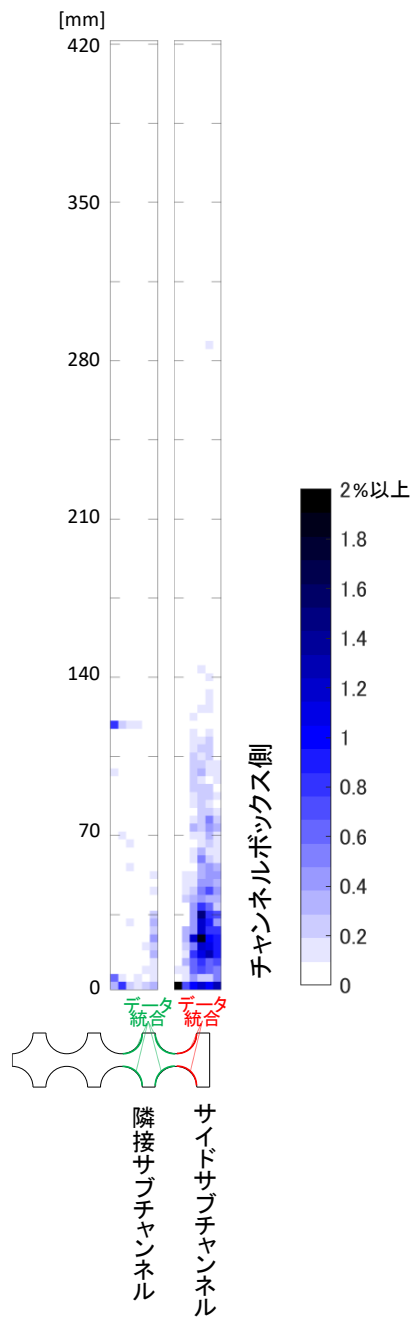


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (12/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 7m/s、サイド体系、スプレーサ無)

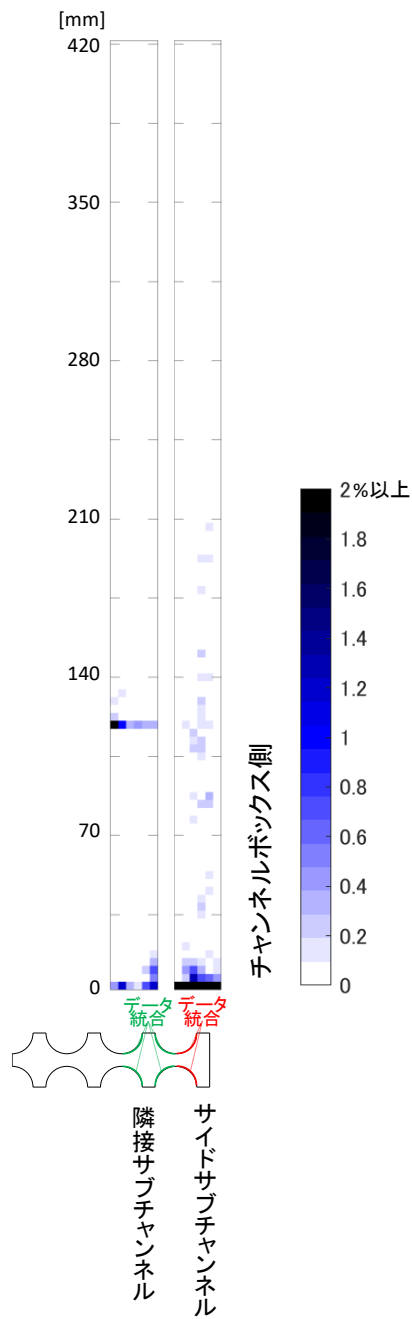


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (13/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 7m/s、サイド体系、丸セル型)

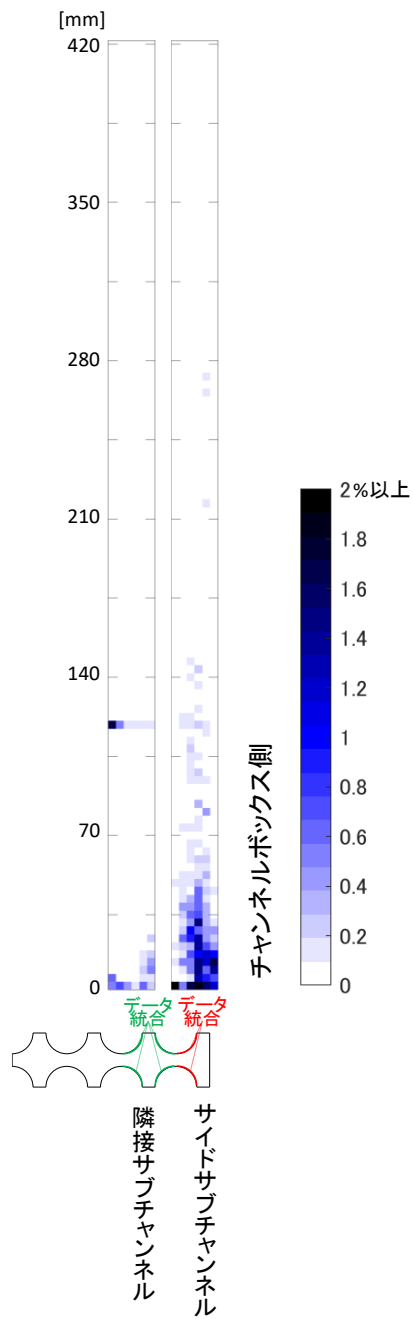


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (14/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 7m/s、サイド体系、グリッド型)

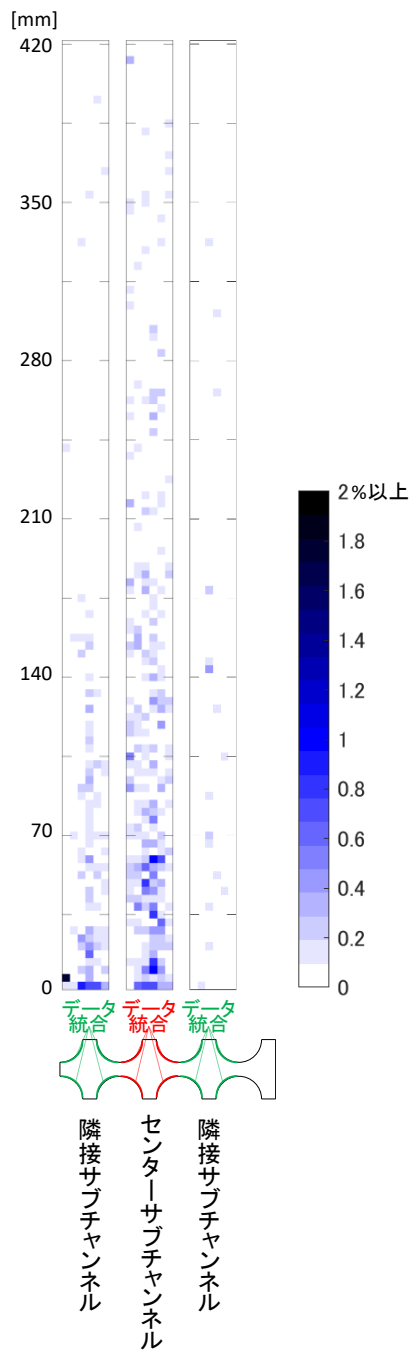


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (15/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 4m/s、センター体系、スパーサ無)

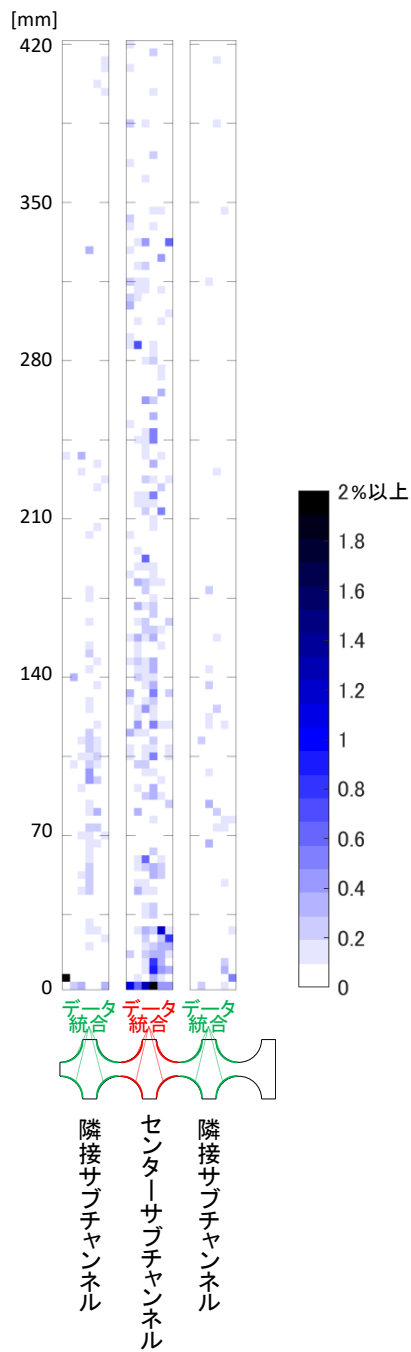


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (16/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 4m/s、センター体系、丸セル型)

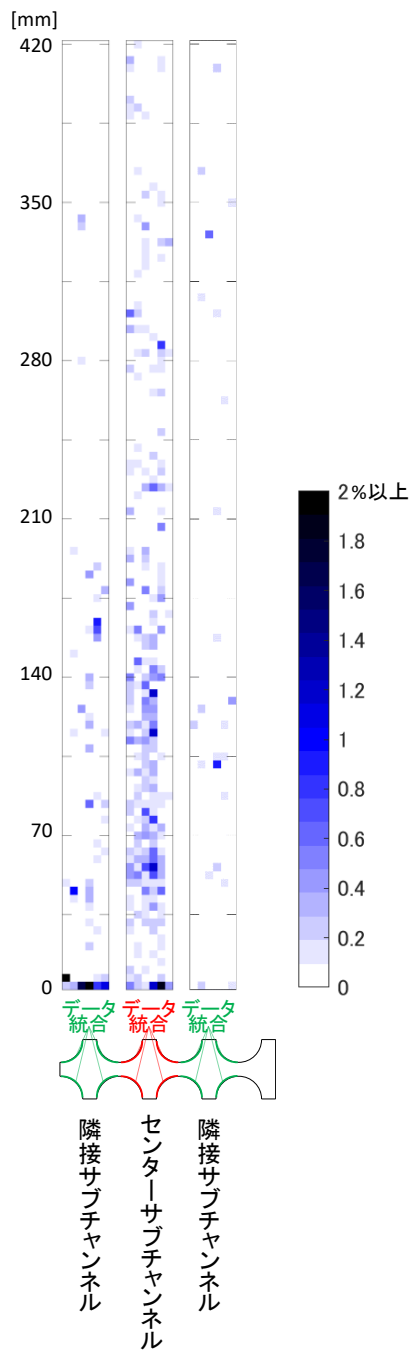


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (17/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 4m/s、センター体系、グリッド型)

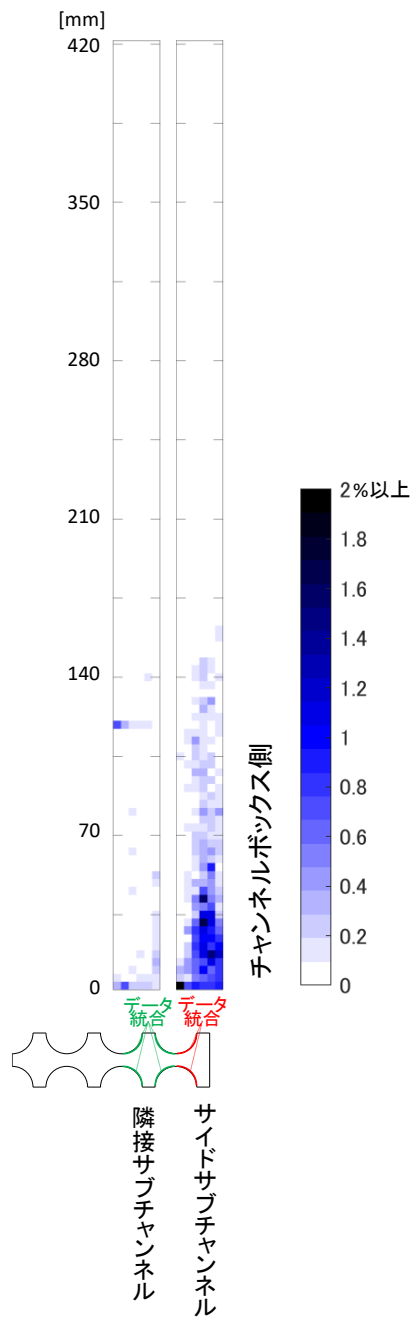


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (18/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 4m/s、サイド体系、スプレーサ無)

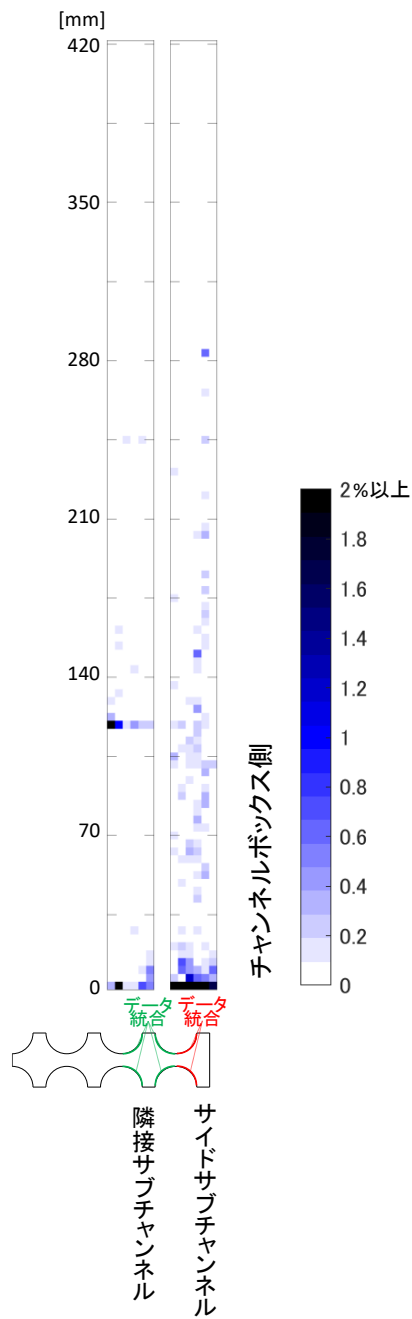


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (19/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 4m/s、サイド体系、丸セル型)

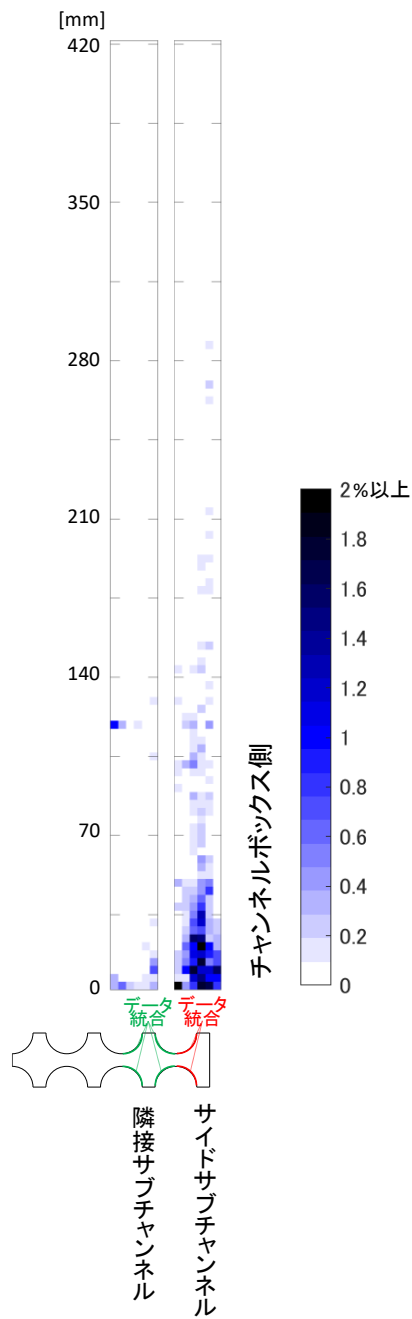


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (20/56：液滴放出量 132mg/min、空気流速平均値 4m/s、サイド体系、グリッド型)

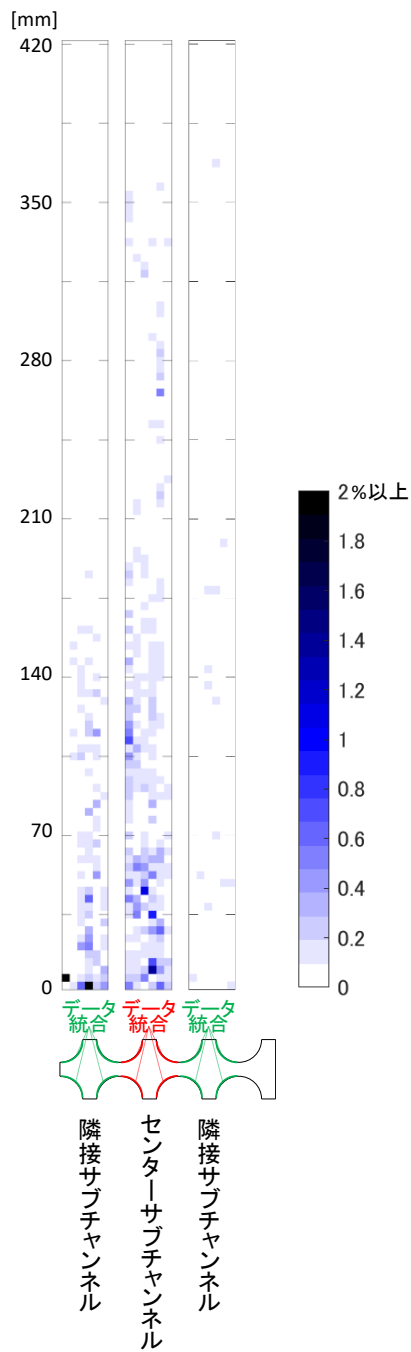


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (21/56：液滴放出量 144mg/min、空気流速平均値 10m/s、センター体系、スパーサ無)

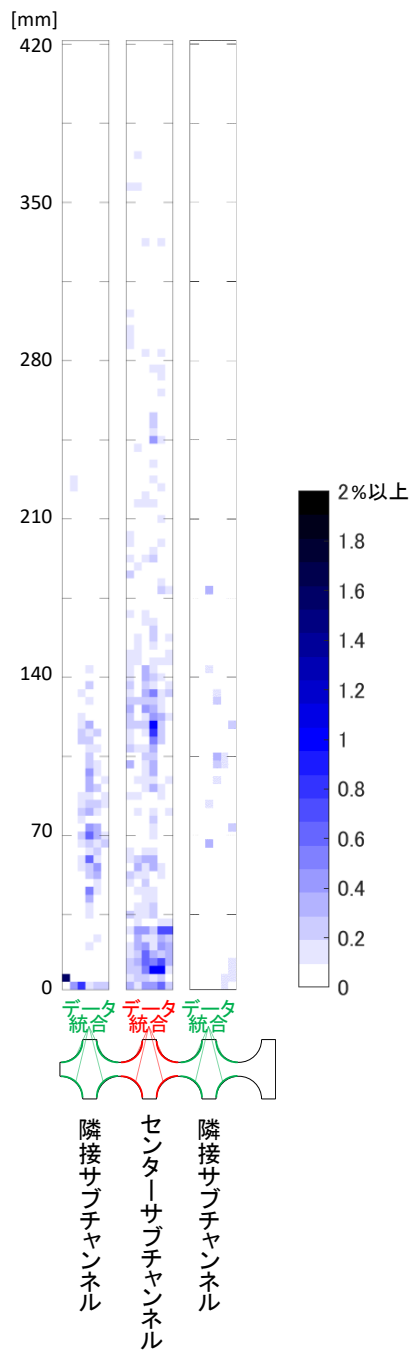


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (22/56：液滴放出量 144mg/min、空気流速平均値 10m/s、センター体系、丸セル型)

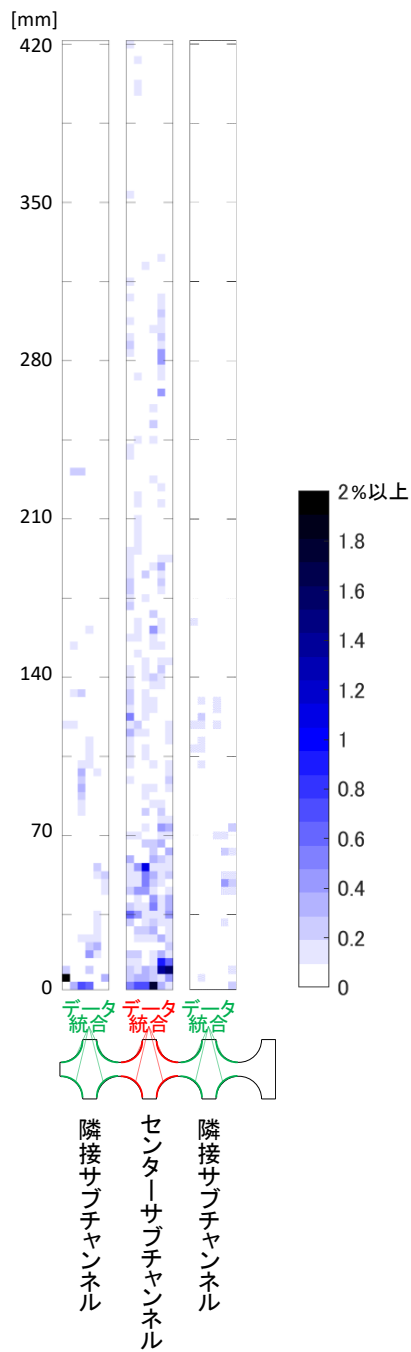


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (23/56：液滴放出量 144mg/min、空気流速平均値 10m/s、センター体系、グリッド型)

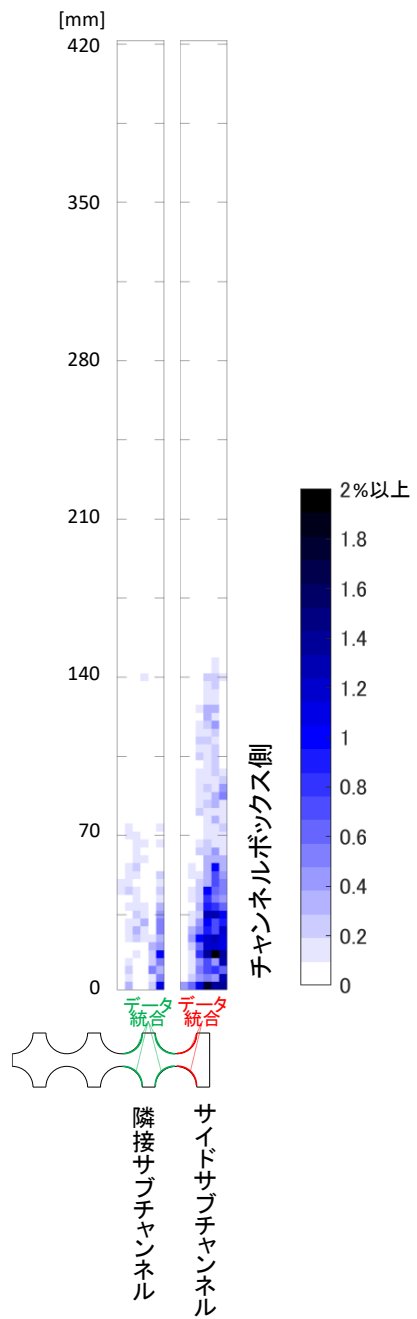


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (24/56：液滴放出量 144mg/min、空気流速平均値 10m/s、サイド体系、スプレーサ無)

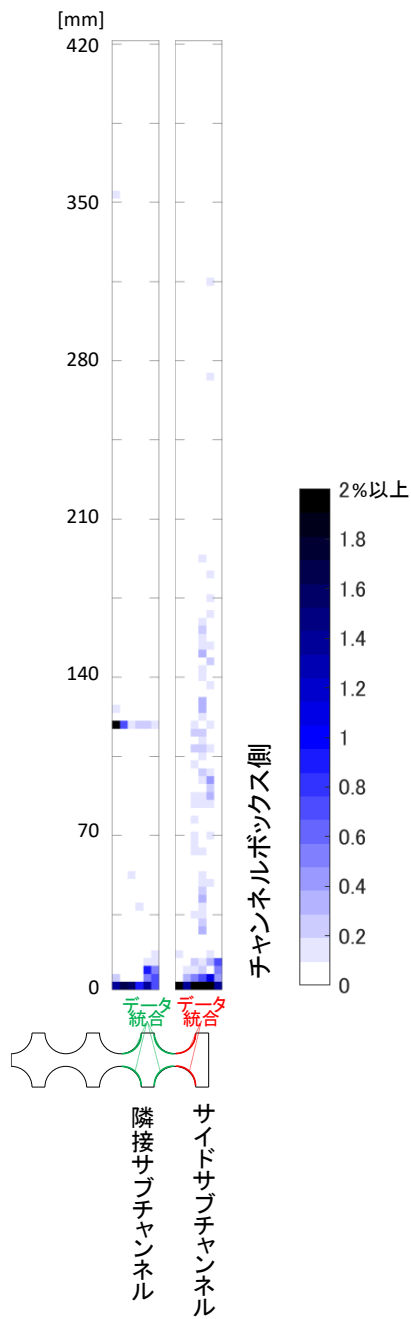


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (25/56：液滴放出量 144mg/min、空気流速平均値 10m/s、サイド体系、丸セル型)

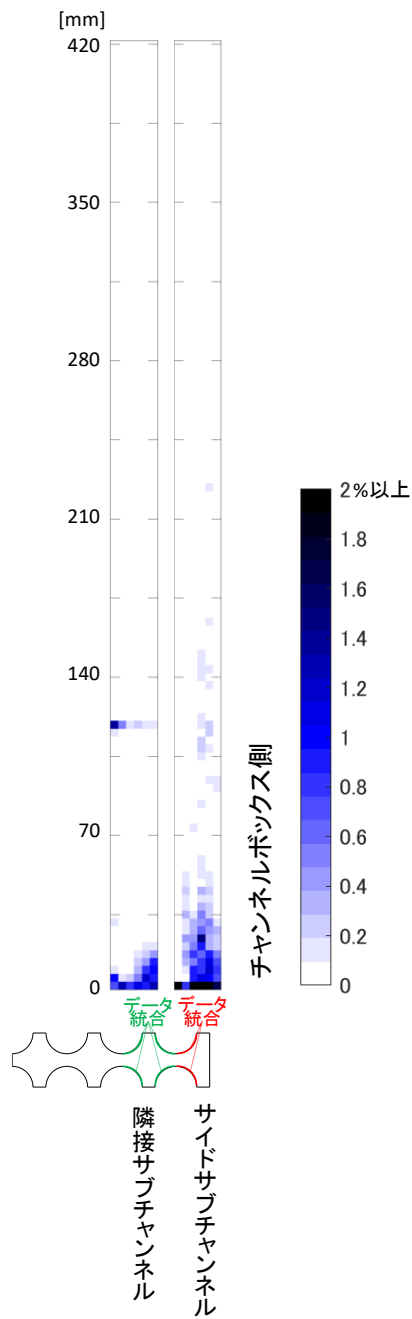


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (26/56：液滴放出量 144mg/min、空気流速平均値 10m/s、サイド体系、グリッド型)

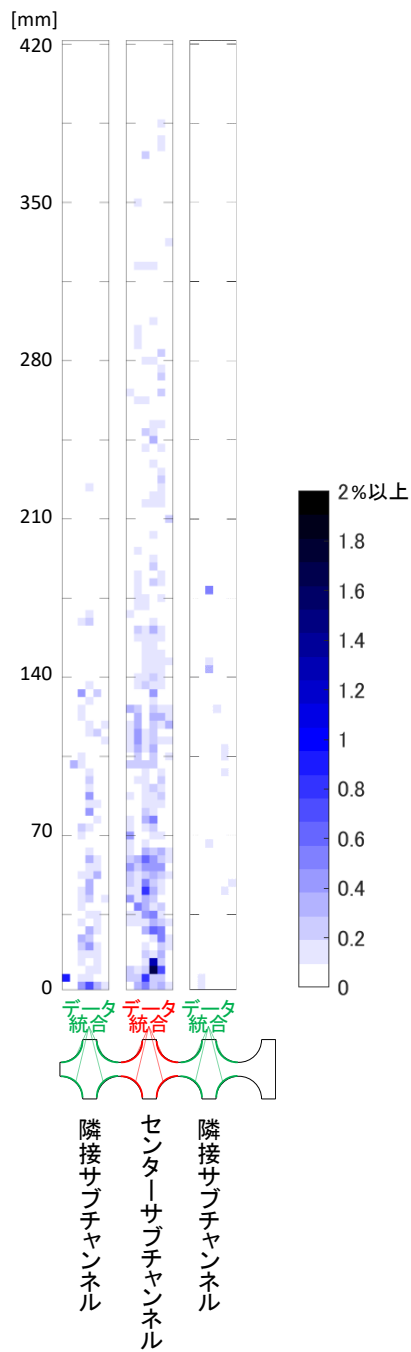


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (27/56：液滴放出量 144mg/min、空気流速平均値 7m/s、センター体系、スプレーサ無)

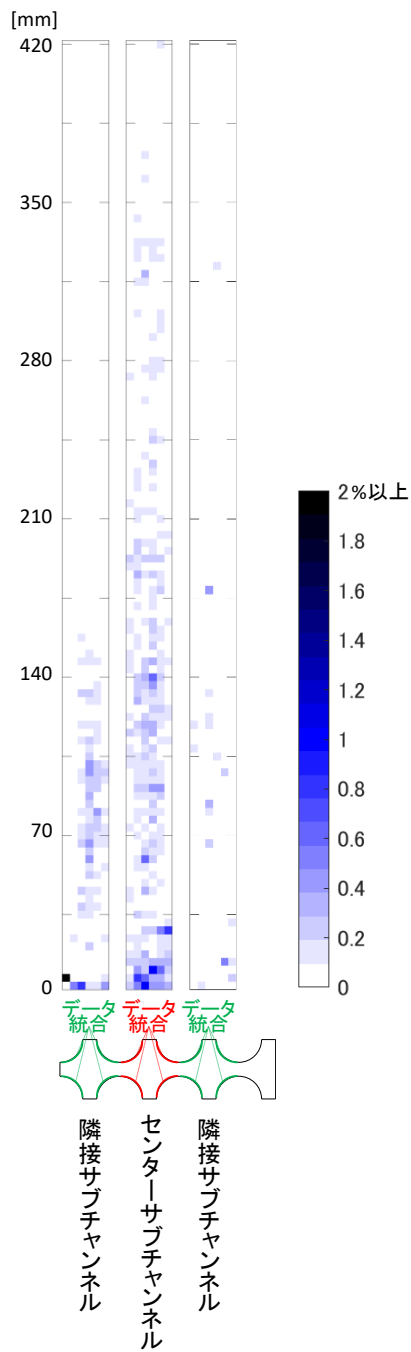


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (28/56：液滴放出量 144mg/min、空気流速平均値 7m/s、センター体系、丸セル型)

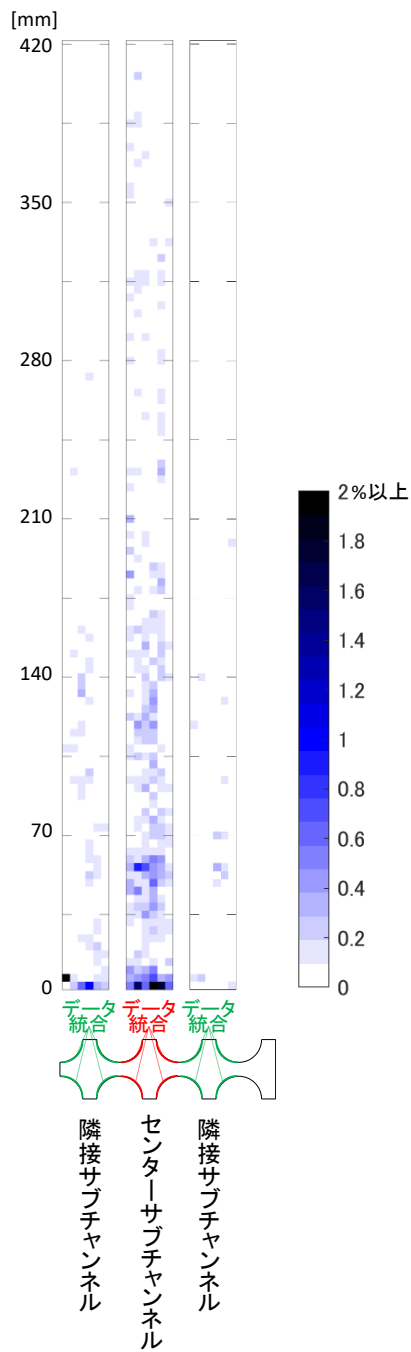


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (29/56：液滴放出量 144mg/min、空気流速平均値 7m/s、センター体系、グリッド型)

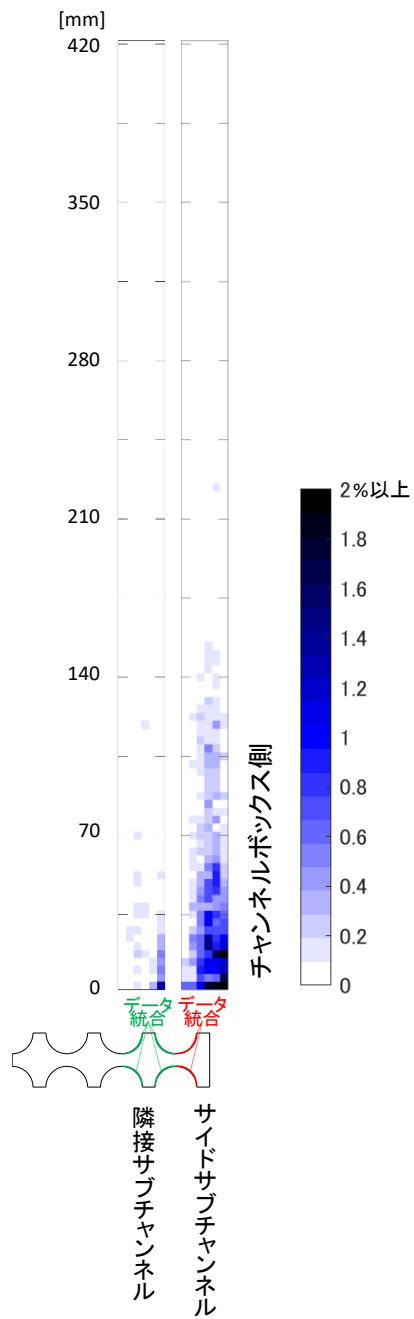


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (30/56：液滴放出量 144mg/min、空気流速平均値 7m/s、サイド体系、スプレーサ無)

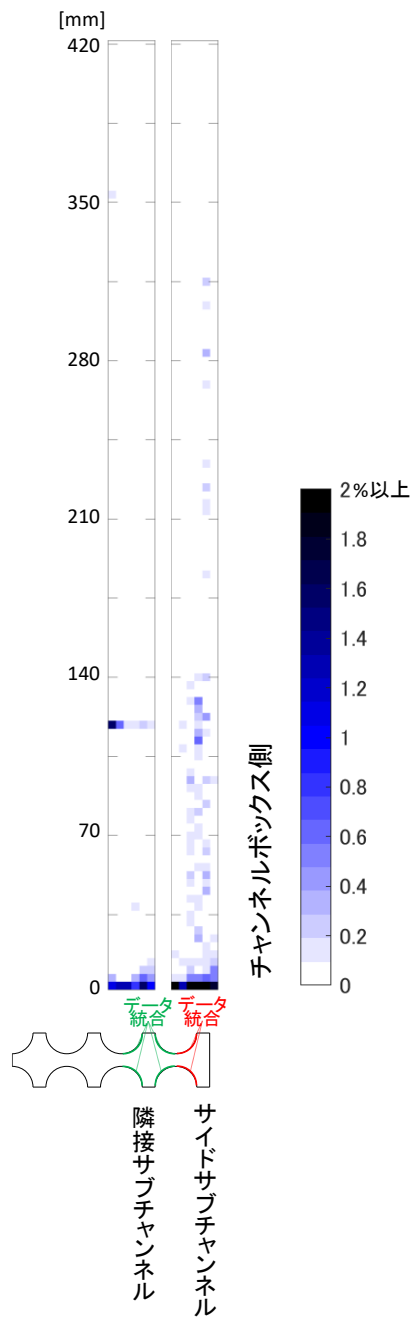


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (31/56：液滴放出量 144mg/min、空気流速平均値 7m/s、サイド体系、丸セル型)

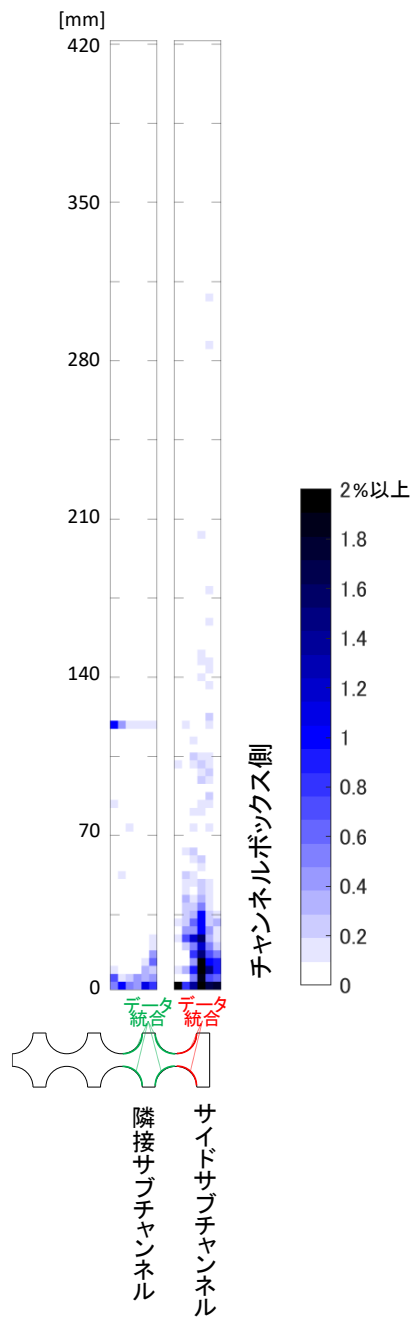


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (32/56：液滴放出量 144mg/min、空気流速平均値 7m/s、サイド体系、グリッド型)

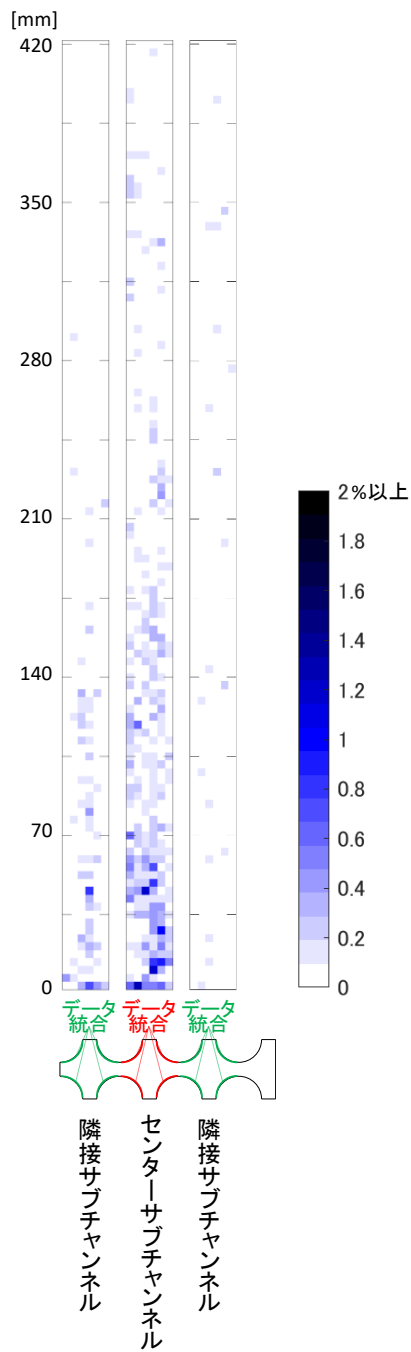


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (33/56：液滴放出量 144mg/min、空気流速平均値 4m/s、センター体系、スパーサ無)

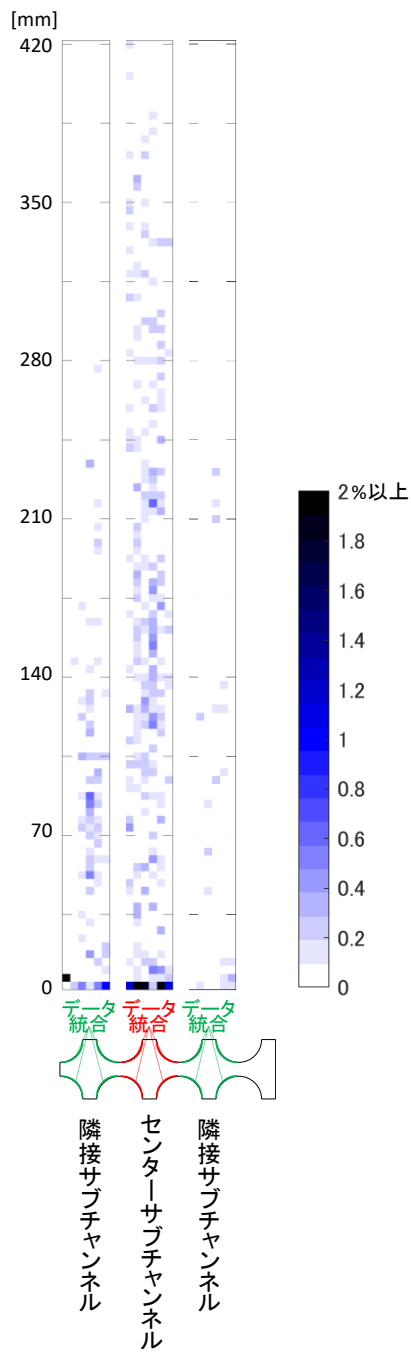


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (34/56：液滴放出量 144mg/min、空気流速平均値 4m/s、センター体系、丸セル型)

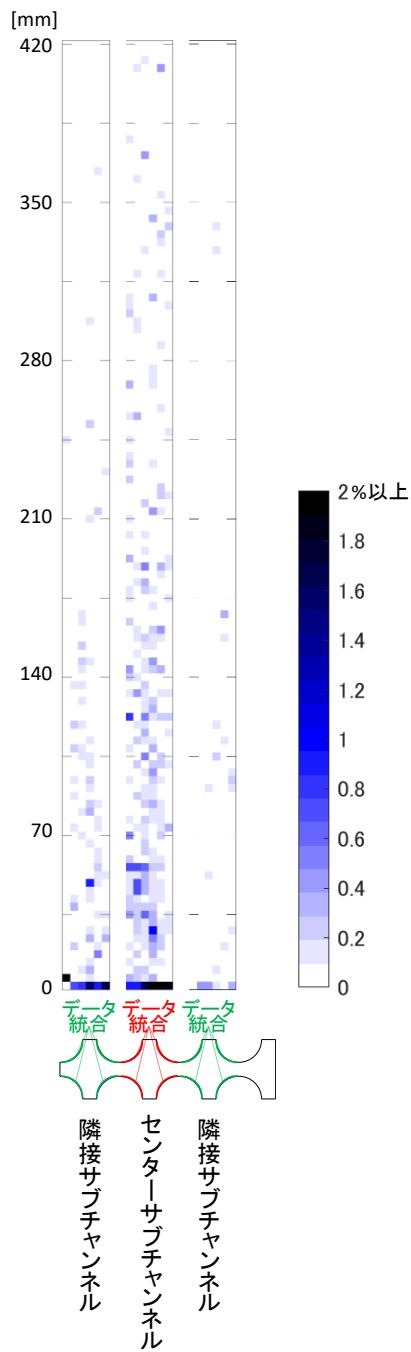


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (35/56：液滴放出量 144mg/min、空気流速平均値 4m/s、センター体系、グリッド型)

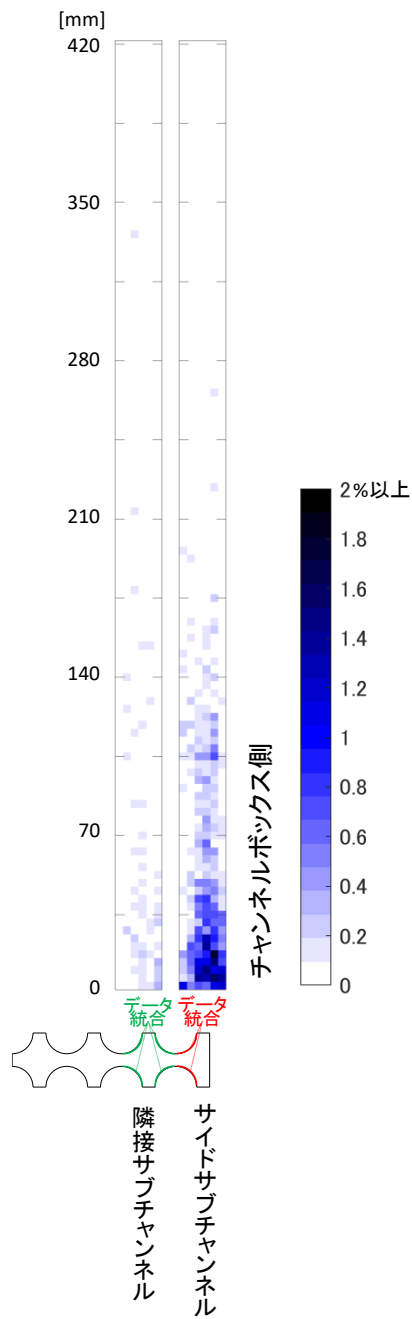


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (36/56：液滴放出量 144mg/min、空気流速平均値 4m/s、サイド体系、スプレーサ無)

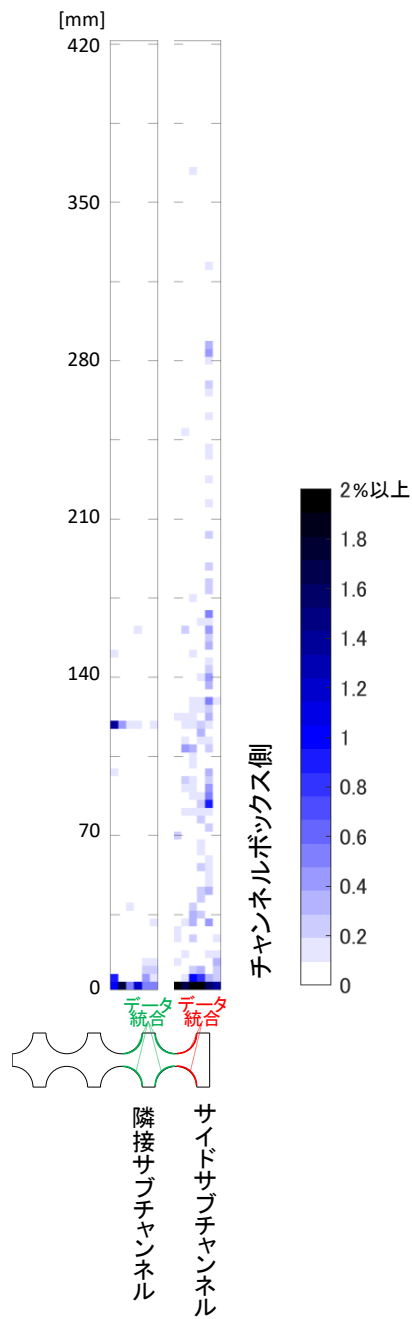


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (37/56：液滴放出量 144mg/min、空気流速平均値 4m/s、サイド体系、丸セル型)

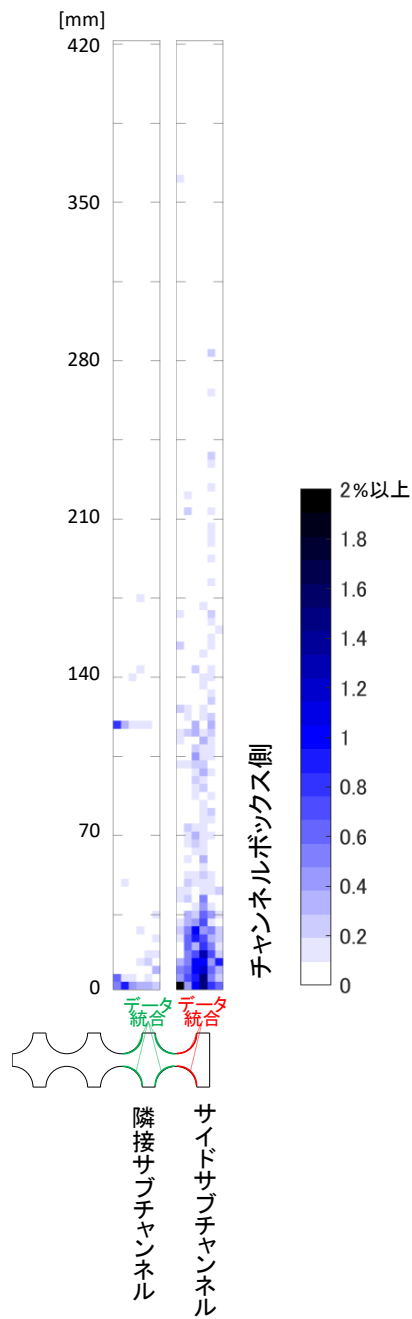


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (38/56：液滴放出量 144mg/min、空気流速平均値 4m/s、サイド体系、グリッド型)

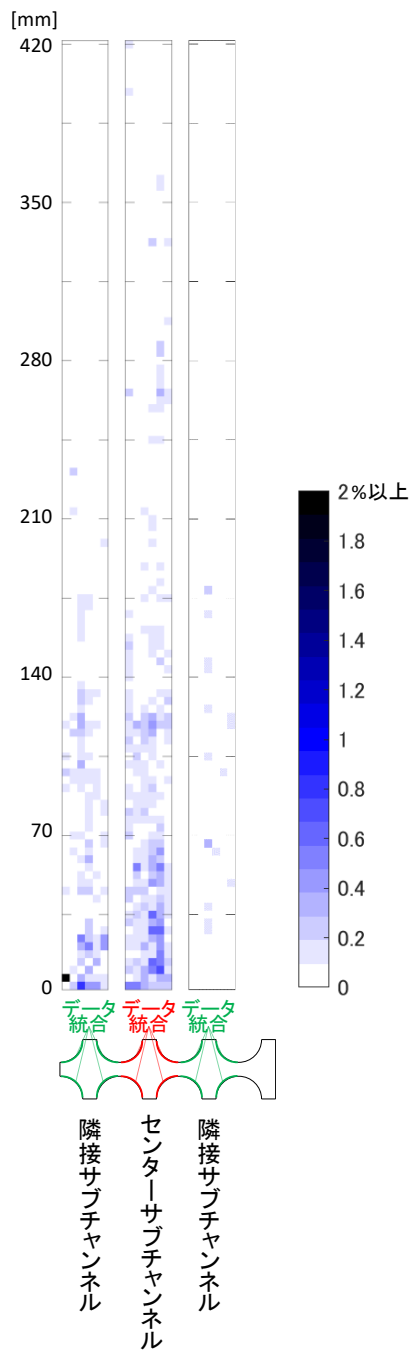


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (39/56：液滴放出量 163mg/min、空気流速平均値 10m/s、センター体系、スパーサ無)

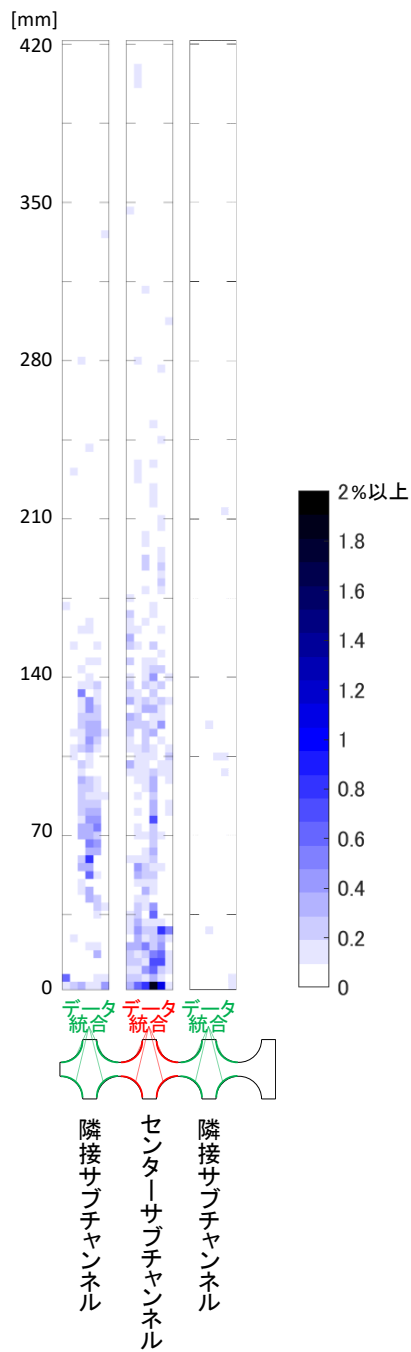


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (40/56：液滴放出量 163mg/min、空気流速平均値 10m/s、センター体系、丸セル型)

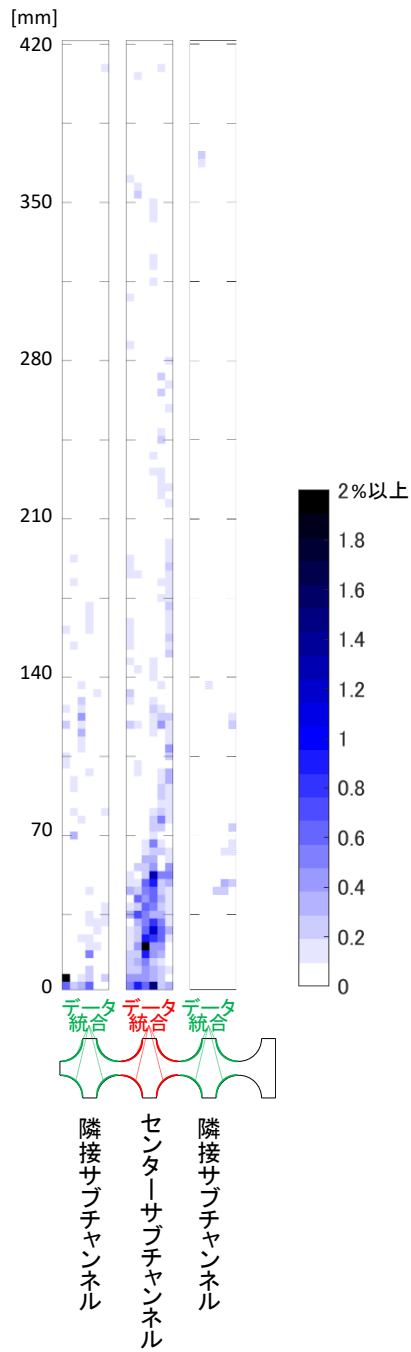


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (41/56：液滴放出量 163mg/min、空気流速平均値 10m/s、センター体系、グリッド型)

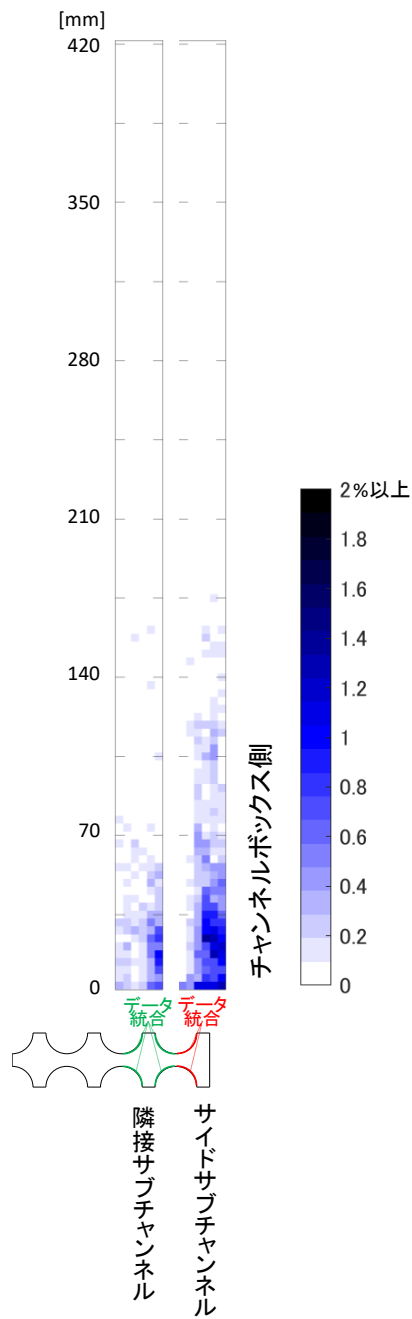


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (42/56：液滴放出量 163mg/min、空気流速平均値 10m/s、サイド体系、スプレーサ無)

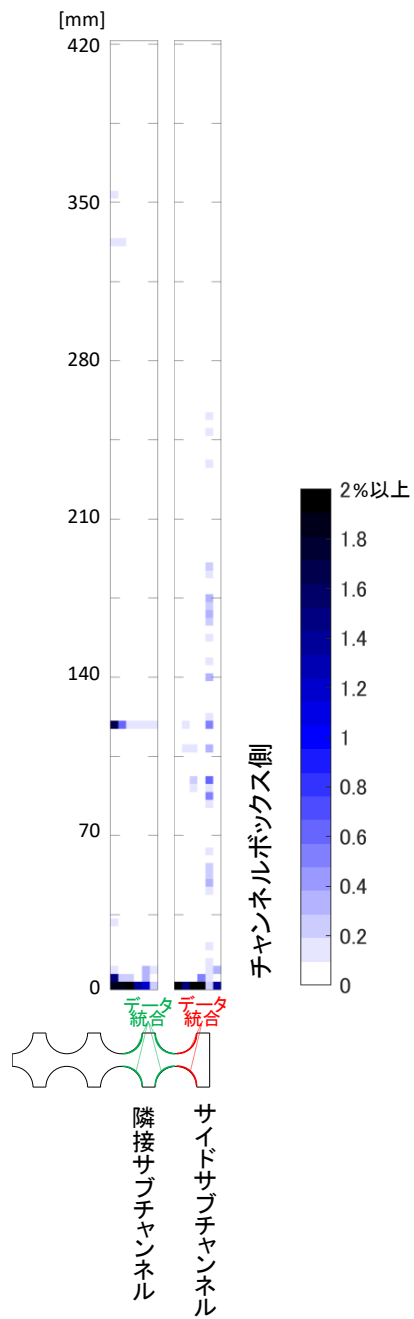


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (43/56：液滴放出量 163mg/min、空気流速平均値 10m/s、サイド体系、丸セル型)

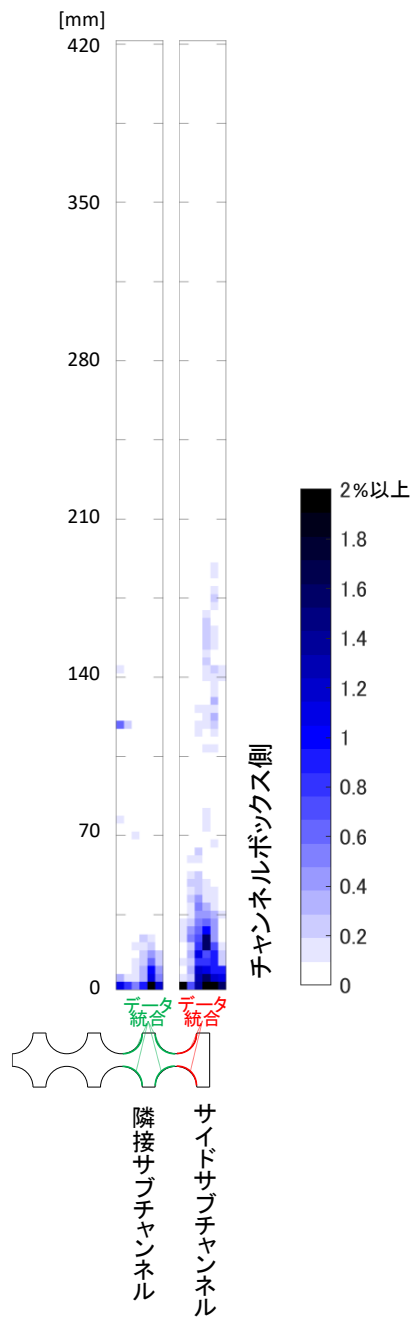


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (44/56：液滴放出量 163mg/min、空気流速平均値 10m/s、サイド体系、グリッド型)

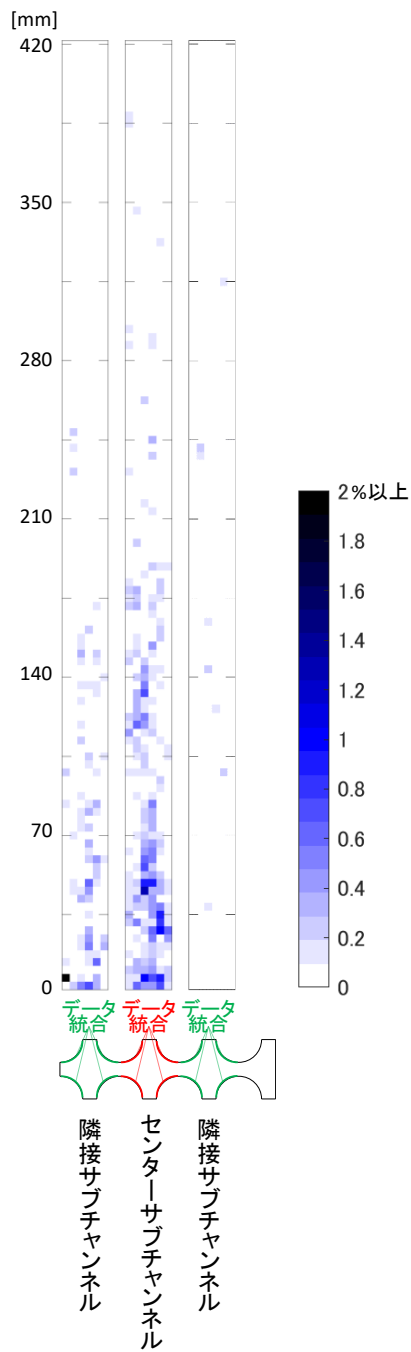


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (45/56：液滴放出量 163mg/min、空気流速平均値 7m/s、センター体系、スパーサ無)

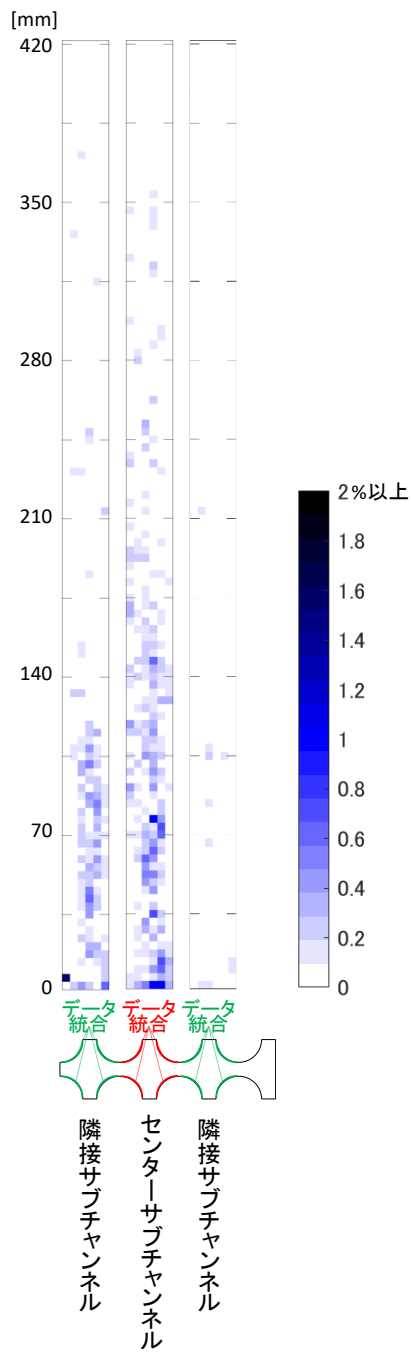


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (46/56：液滴放出量 163mg/min、空気流速平均値 7m/s、センター体系、丸セル型)

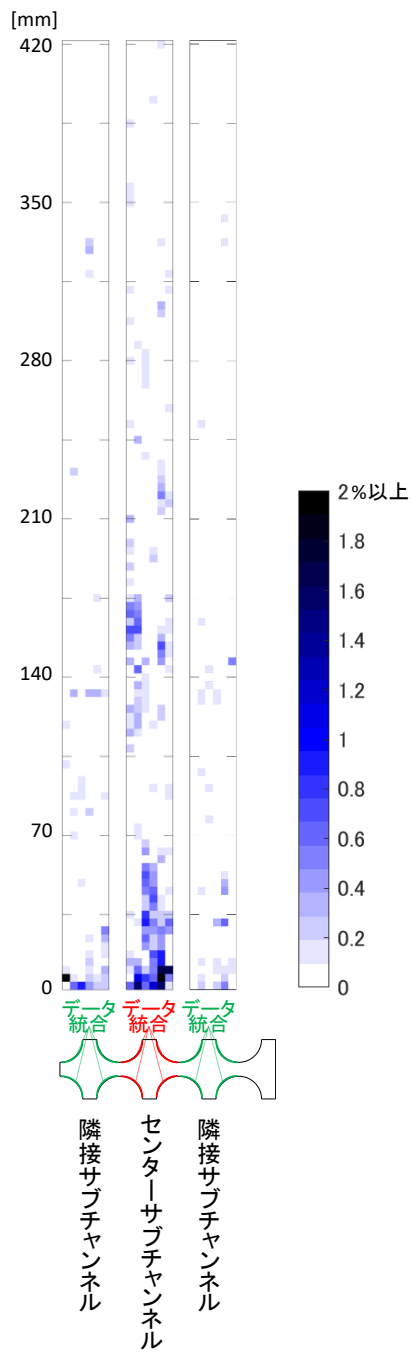


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (47/56：液滴放出量 163mg/min、空気流速平均値 7m/s、センター体系、グリッド型)

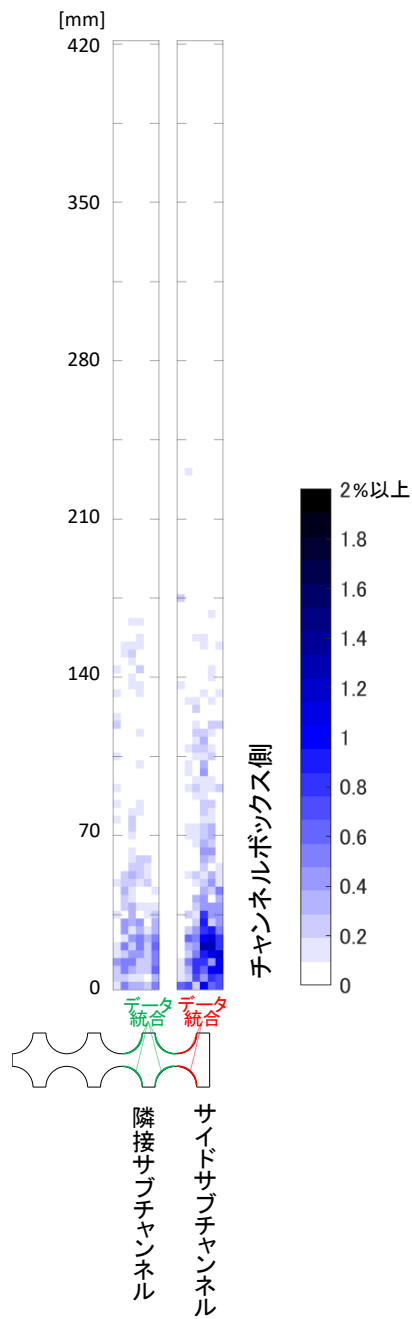


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (48/56：液滴放出量 163mg/min、空気流速平均値 7m/s、サイド体系、スプレーサ無)

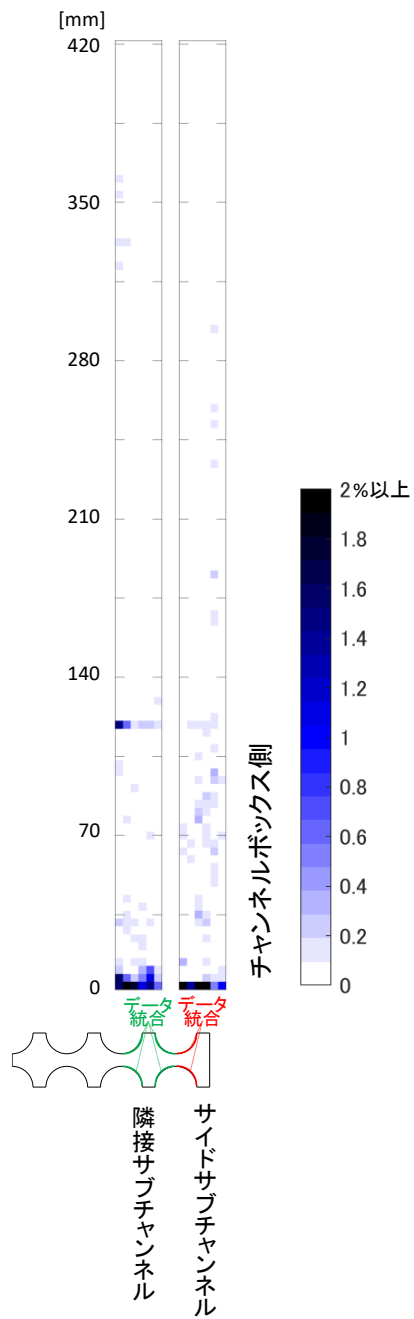


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (49/56：液滴放出量 163mg/min、空気流速平均値 7m/s、サイド体系、丸セル型)

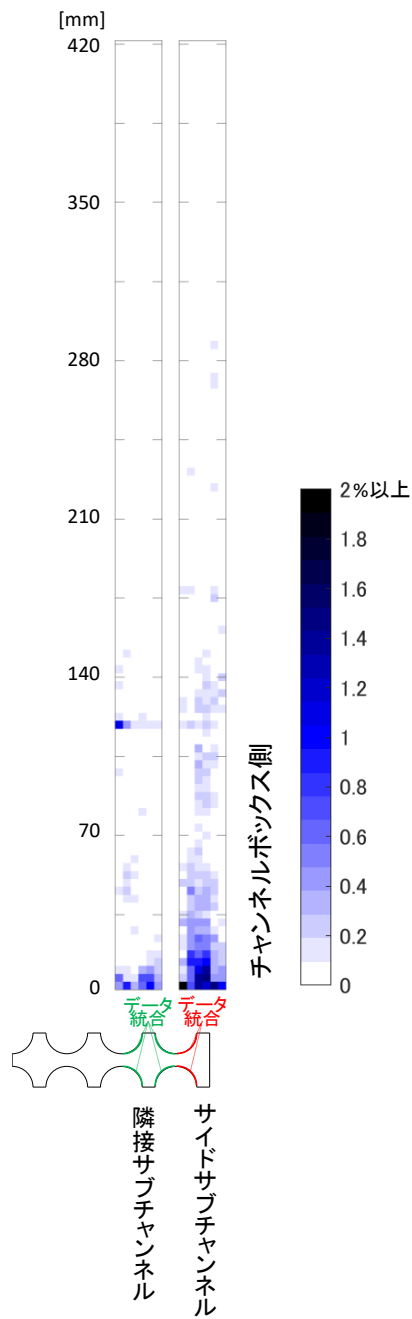


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (50/56：液滴放出量 163mg/min、空気流速平均値 7m/s、サイド体系、グリッド型)

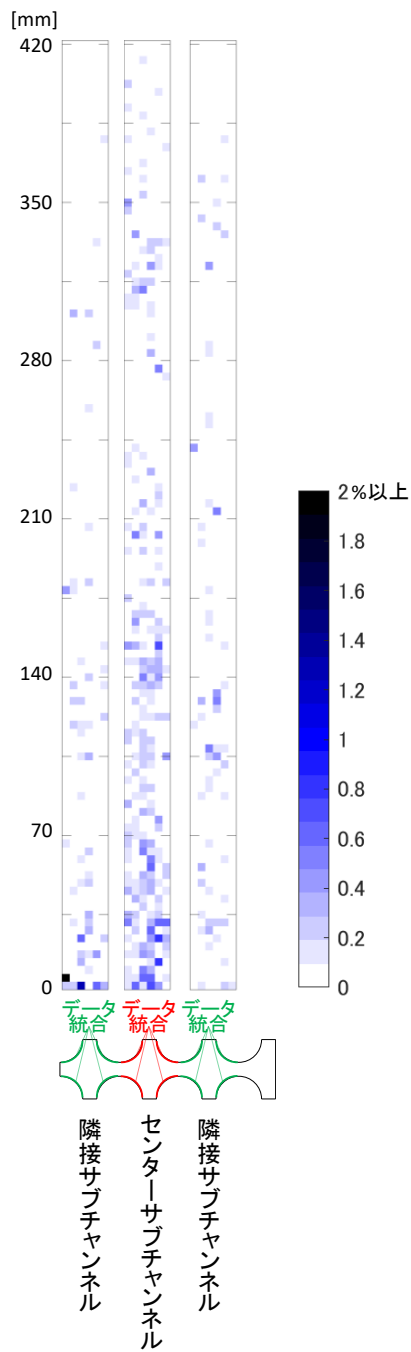


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (51/56：液滴放出量 163mg/min、空気流速平均値 4m/s、センター体系、スパーサ無)

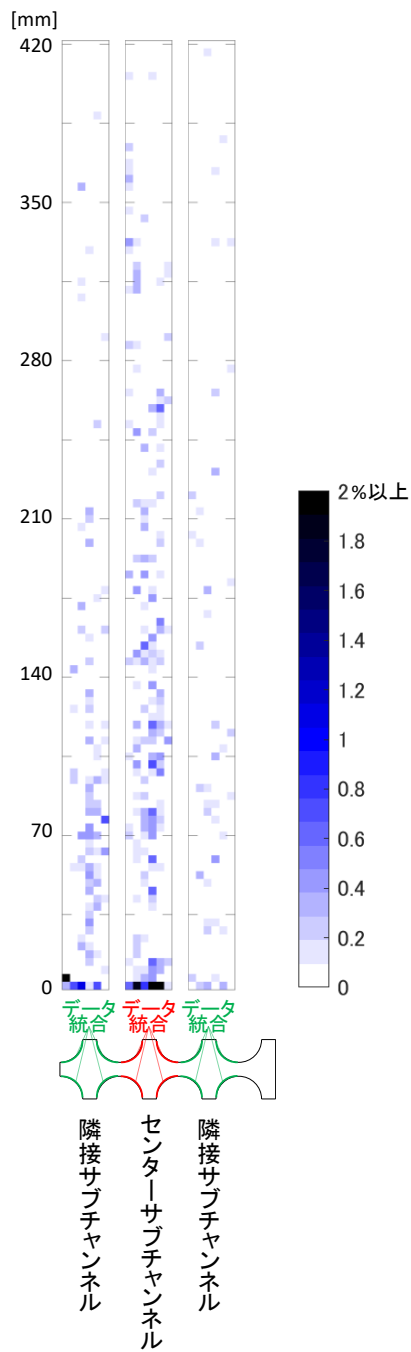


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (52/56：液滴放出量 163mg/min、空気流速平均値 4m/s、センター体系、丸セル型)

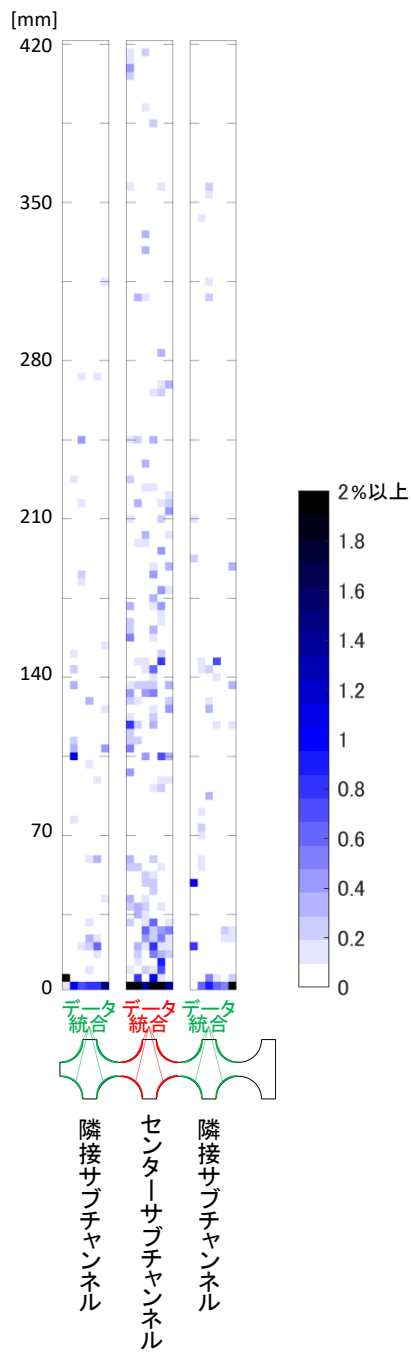


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (53/56：液滴放出量 163mg/min、空気流速平均値 4m/s、センター体系、グリッド型)

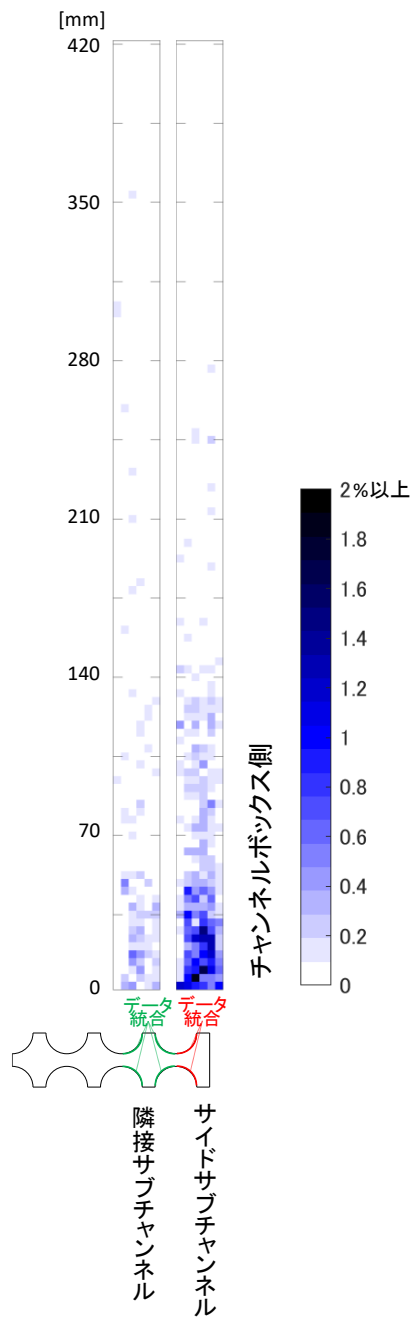


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (54/56：液滴放出量 163mg/min、空気流速平均値 4m/s、サイド体系、スプレーサ無)

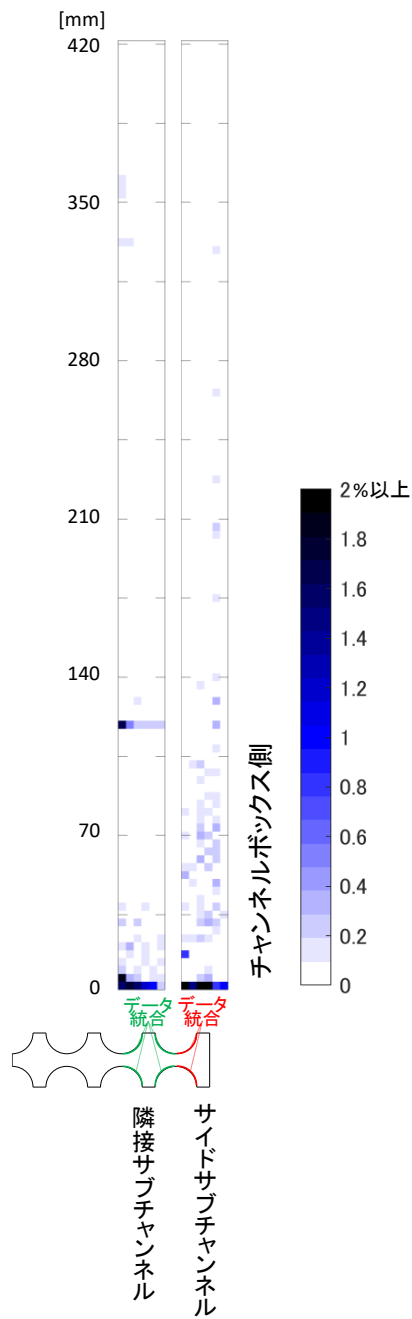


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (55/56：液滴放出量 163mg/min、空気流速平均値 4m/s、サイド体系、丸セル型)

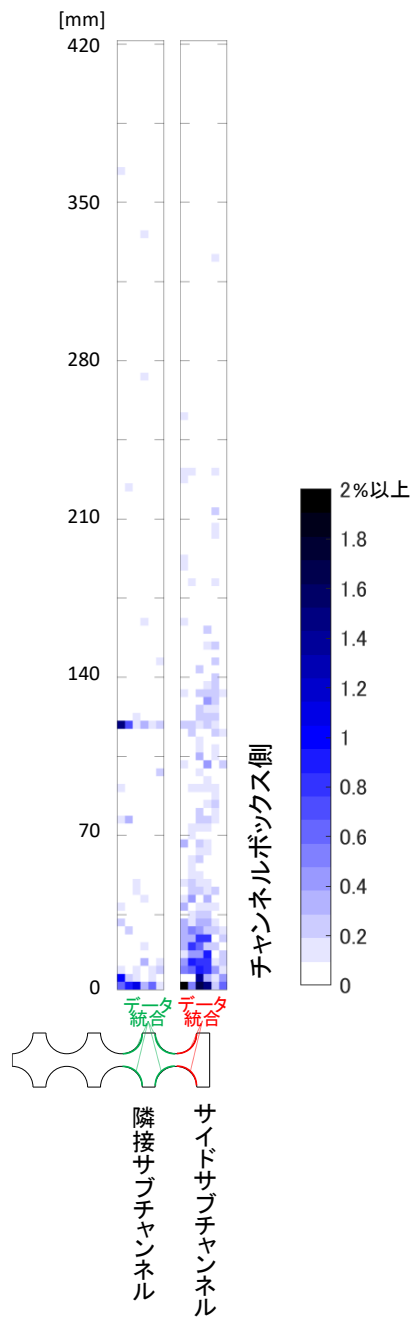


図 3-6 液滴付着計測：液滴付着頻度と分布
 (56/56：液滴放出量 163mg/min、空気流速平均値 4m/s、サイド体系、グリッド型)

4. 結言

BWR 燃料集合体の除熱性能に資するスぺ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（スぺーサ影響評価試験）事業」において、1 年目に試験装置の製作、2 年目に代表的な模擬スぺーサを対象に計測プロセスの体系化を行い、その成果を踏まえ 3 年目の本年度は以下に示す業務を実施した。

- 過年度までの成果で製作された実験装置に対し、今年度新たに下記の改良を施した。
 - 液滴運動の光学計測性能を向上するため、テスト部の可視化流路に改良を施した。流路の外部境界であるアクリル壁の厚さを極力薄くし、模擬燃料棒は光を反射しない材質で造形した。
 - 水の表面張力を考慮し、形状の整った液滴を生成・射出しやすい構造にノズルを改造した。金属細管に尖状の先端の針金を挿入し、細管の上端部に PFA チューブを連結して水の濡れ性を抑え、より針金側の周囲に水が行き渡り、上部先端まで伝って液滴を形成し易い構造とした。
 - 試験対象とする模擬スぺーサの種類を拡張した。丸セル型及びグリッド型を基本に、前者にはフロータブ、後者には旋回羽を付属するタイプを考慮し、各々を三次元造形にて製作した。
- 以上の改良により整備された実験装置を用いて計測を実施し、下記の成果が得られた。
 - 各種スぺーサに対し、スぺーサ通過後の液滴径及び速度、並びに模擬燃料棒表面への付着分布及び頻度が計測データとして得られ、基礎的な実験データベースとして蓄積された。
 - 液滴に及ぼすスぺーサの効果については、丸セル型及びグリッド型各々のスぺーサの形状に応じて想定される挙動が観測され、定性的にも計測データが各種スぺーサの持つ効果を表していることが確認された。ただし、スぺーサに付属した旋回羽及びフロータブについては、それらの効果を把握するにはさらに形状や寸法の感度を調べる必要性が認識された。

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（スぺーサ影響評価試験）事業 成果報告書」、平成 29 年 3 月
- 4) 一般財団法人電力中央研究所、「平成 29 年度原子力施設等防災対策等委託費（スぺーサ影響評価試験）事業 成果報告書」、平成 30 年 3 月
- 5) OECD/NEA, “NUPEC BWR Full-size Fine-mesh Bundle Test (BFBT) Benchmark, Volume 1 : Specifications”, 2006.
- 6) KAWAHARA, A., et al., “Two-phase Annular Flows Across Grid Spacer with Mixing Vane in 3X3 Rod Channel”, 8th European-Japanese Two-Phase Flow Group Meeting (EJTPFGM-8), 2018.
- 7) LaVision GmbH, “Product-Manual DaVis 8.4 Software”
- 8) LaVision GmbH, “Product-Manual FlowMaster”
- 9) LaVision GmbH, “ParticleMaster Shadow Quick Start Manual”
- 10) Arai, T., et al., “Concurrent upward liquid slug dynamics on both surfaces of annular channel acquired with liquid film sensor”, Exp. Therm. Fluid Sci. 60 (2014) 337-345.
- 11) Teletronic Rossendorf GmbH, “WMS200 Manual”, <http://mpmt.de/en/products/wire-mesh-sensor/en/downloads/manual-wire-mesh-sensor-system-wms200>
- 12) Kunugi, T., et al., “Measurements of liquid film and droplets of annular two-phase flow on a rod-bundle geometry with spacer”, International Journal of Multiphase Flow, 70, 2015.
- 13) Nishida, K., “Research Needs for Thermal-Hydraulics”, Conference and Workshop on the Research Needs of Boiling Water Reactors, 2016.