

高解像度 PSV 技術を基盤とする気流熱量計測技術の開発

山梨大学大学院
医工農学総合教育部
博士課程学位論文

2024 年 3 月

塚本 祐作

目次

第1章	序論	- 1 -
1.1	研究背景	- 1 -
1.2	PSVの基礎事項	- 2 -
1.3	研究目的	- 4 -
第2章	特徴点マッチング法を用いたストリーク検出法の利用可能性	- 5 -
2.1	緒言	- 5 -
2.2	特徴点マッチング法.....	- 5 -
2.3	人工画像	- 6 -
2.4	非破壊ストリーク数.....	- 8 -
2.5	検出性能の評価.....	- 8 -
2.5	利用可能性の検討.....	- 9 -
2.6	結言	- 11 -
第3章	ストリーク破壊シミュレーションの開発と最適照明時間の推定法	- 12 -
3.1	緒言	- 12 -
3.2	ストリーク破壊因子の分類.....	- 12 -
3.3	最適照明時間の定式化.....	- 12 -
3.3.1	一様流の場合.....	- 12 -
3.3.2	非一様流の場合.....	- 13 -
3.4	ストリーク破壊シミュレーション.....	- 14 -
3.5	破壊頻度の分析.....	- 16 -
3.6	最適照明時間と最適ストリーク数.....	- 17 -
3.7	速度ダイナミックレンジとベクトル密度.....	- 19 -
3.8	結言	- 22 -
第4章	総括	- 24 -
参考文献		- 26 -
謝辞 - 28 -		

第1章 序論

1.1 研究背景

地中熱ヒートポンプは空気熱ヒートポンプに比べて省エネルギー性に優れたシステムである [1-3]. 図 1.1 に示した 2 つの異なる方式に基づく地中熱ヒートポンプのうち, 比較的普及が進んでいる間接膨張方式では地中に挿入された 1 次系配管内に流れる不凍液が採放熱することで地中との熱交換が行われる. 一般に, 間接膨張方式を導入する際に必要なボアホール深さは 100 m ~ 150 m 程度とされ, 浅い場合には熱交換を十分に行えず性能不良になることが指摘されている [4]. また, ボアホールの掘削にかかる費用は深さに比例して高騰することから, 導入例のほとんどは空港や市役所のような中規模以上の施設に限定されており, 一般家庭への普及を妨げる要因の 1 つになっている. 一方, 直接膨張方式は 1 次系配管のみの構造となっており, 不凍液の代わりに冷媒 (例えば R410A, R32 などの代替フロン) が充填されている. したがって, 地中との熱交換は冷媒の凝縮・蒸発に伴う潜熱を利用できることから, 間接膨張方式に比べて配管の単位長さあたりに交換できる熱量に優れ [5], ボアホールの長さを短縮することが可能である. しかし, いくつかの初期の研究では [6-9], 冷媒循環の不安定性が明らかとなり, Wang ら [10] はより効率的で信頼性の高いシステムにするために熱交換器形状の重要性を指摘した. 近年, 三瓶らは [11], 冷媒の蒸発を促進するために導入した複数細管を有する 30 m の配管を用いた熱交換器システムの性能評価を行い, 配管底部での発生が問題となっていた冷媒循環の不安定性を解消する技術を確立した. これらの技術的ブレイクスルーにより, 直接膨張方式に基づく地中熱ヒートポンプはその実用化に期待が高まっている.

一般に, ヒートポンプの性能は成績係数 (Coefficient of Performance, 以下 COP) に基づいて評価される. COP の算出には熱交換器が地中とやりとりした熱量を見積もる必要があり, 間接膨張方式ではヒートポンプ入口温度と出口温度, および 1 次系配管内を循環する熱媒体の流量を求めることで算出できる [12,13]. 一方, 直接膨張方式の場合は熱交換器内を流れる冷媒が気液二相流になることから, 間接膨張方式で用いられていたような計測方法は困難であり, 代わりに室内機側の温度差, 湿度差, および気流流量から熱量を換算する空気エンタルピー法 [14] が適用される. Funatani らは [15], 空気エンタルピー法を地中熱ヒートポンプに適用する際に生じる流量計測の誤差 (吹出口の面積は一定であるから, すなわち流速計測の誤差) を指摘し, スキャニング PIV (Particle Image Velocimetry) を用いた補正手法を提案した. ここで PIV とは, 高速度カメラとレーザー光シートを用いた可視化計測法であり, 図 1.2 に示すように熱線風速計で気流断面の 1 点のみを計測していたこと (すなわち流速がどの場所も一定と近似していたこと) に由来する流量の過大評価を補正するために使用された. Funatani らによれば, この補正により COP の算出精度は冷房運転時で 60.6 % から 2.5 % に, 暖房運転時には 15.2 % から 0.9 % に低減され, 高精度熱量計測技術が確立されたと報告している.

一方, PIV 計測を実施するには一般に, 高繰返し性が要求される PIV 用の CCD / CMOS カメラ, 強力なパルスレーザー光源, 専用の解析ソフトウェアなど高価な機材が必要で, 単純な 2 次元 PIV でも 10,000 ドル以上, 4 台以上のカメラを用いる Tomo-PIV [16,17] では 100,000 ドル以上の導入コストがかかる可能性がある. これまで PIV の経済性に焦点を当てた研究はほとんどなかったが, 近年は PIV における経済面での負担が問題視されており [18-21], これらの事実が産業界に及ぼす影響は軽視されるべきではない. Aguirre-Pablo らは [18], PIV にかかる費用を下げるためスマートフォンによる撮影法を提案するなど, これまでにない新しい PIV 手法が注目されつつある. また, 実際に PIV を実施するには高度な専門性と経験を必要とすることも指摘されており [20], この点も含めて研究開発のダイバーシティを妨げる要因になっている. したがって, より低コストで簡便な可視化計測シ

システムを見出すことは、地中熱ヒートポンプをはじめとする各種エネルギー分野の新技术開発における開発速度や多様性を維持するうえで極めて重要な課題である。そこで本研究では、古くから低コストで簡便かつ高解像度な可視化計測技術として知られていた PSV (Particle Streak Velocimetry) とよばれる可視化計測法に注目し、PSV 技術を気流熱量計測に適用するうえで問題となる技術的課題について、その解決方法を検討した。

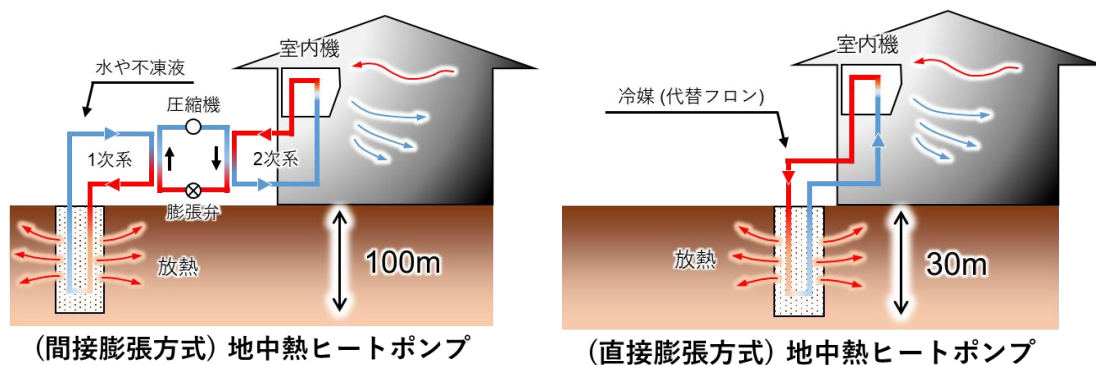


図 1.1 地中熱ヒートポンプの仕組み

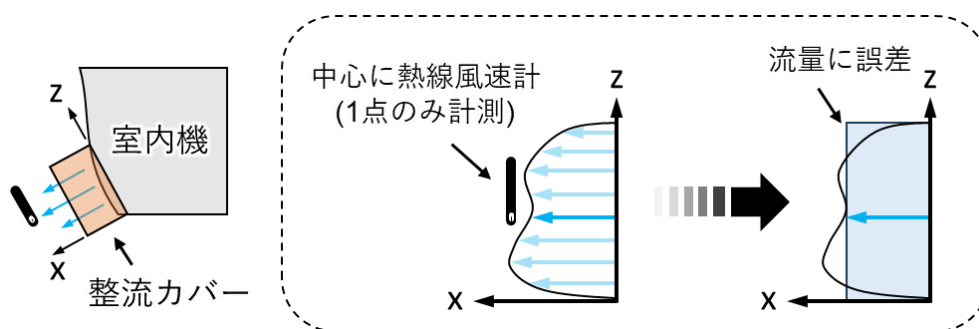


図 1.2 熱線風速計に基づく流量計測の誤差メカニズム

1.2 PSVの基礎事項

PSVは高繰返し性をもたない比較的安価な民生用 CCD / CMOS カメラに基づく流速計測技術であり、図 1.3 に示すようなデジタル一眼レフカメラと連続光源である DPSS (Diode Pumped Solid State) レーザーや LED 照明を用いた構成が一般的である。一眼レフカメラの価格は通常 1,000 ドル以下であり、また DPSS レーザーは近年、1 W 以下の製品を 1,000 ドル以下の価格で入手できることから計測システム全体の経済性に優れ、PIV に比べてコストを 1/10 以下に抑えることもできる。また、一眼レフカメラと PIV 用の高速度カメラの撮影性能を比較すると、それぞれの画素数は約 4,500 万画素 (Nikon, D850, ≤ 10 frames / second), および約 430 万画素 (ノビテック, Phantom T4040, 9,000 frames / second) として) であり、PSV による可視化画像の方が 10 倍以上高い解像度をもつことになる。ここで、解像度の高さは計測可能な最小スケールと最大スケールとの比 (これを空間ダイナミックレンジと呼ぶ) の改善に最も重要なファクターの一つであることから、PIV では高くても 125 程度であるのに対し、PSV では悪く見積もっても 2000 以上の空間ダイナミックレンジをもつ。すなわち、PSV は PIV に比べて 16 倍以上のスケール比に対応した撮影が可能であり、流れ場の大規模構造と微細構造とを一度に計測する性能に優れている。

PSV における典型的な画像解析は、図 1.4 に示すような流れに基づく、最初に得られる

のは、流れ場に散布された個々のトレーサ粒子が描く流跡線（これをストリークと呼ぶ）が多数写る画像である。いくつかのストリークは重複や画像からはみ出しによって形状を破壊されている可能性があるが[22]、適切な撮影条件であれば形状を維持したストリークを十分な数だけ捉えることができる。この元画像に対して、通常は二値化処理やグレースケール化などの事前処理を行い、フィッティング処理[23]などを適用することでストリーク長さを取得し速度へ変換する。なお、このとき取得される速度は移動中の粒子が持つ速度変動を平均化したものであることに注意せねばならない。

図 1.5 には PSV における流れ方向の不確定性[24]を解消するために提案された代表的な手法の概略を示す。通常、単なるパルス照明下で撮影されたストリークは流れ方向に対して対称な形状をもつため、得られた速度ベクトルの向きを自動的に決定することができない。そこで小林ら[25]の初期の研究では、照明強度の強弱を利用してストリークをコード化する始点強調法が提案された。この方法は光源の種類が限定されていた時代においてストロボスコープを用いて簡単にコード化できる利点をもっていたが、始点が太くなるなどの欠点もあり、現在用いられることはまずない。Khaligi らは[26]、照明を 2 つの短いパルスと 1 つの長いパルスに分割する方法を提案した。この手法はコード化照明法と呼ばれ、照明タイミングの制御のみによって確実にコード化できることから、現在においても利用例があり[27, 28]、最も基本的なコード化法の 1 つとして知られる。また、近年はカラー光源を利用した方法[29, 30]や蛍光トレーサを利用した方法[31, 32]なども提案されており、それぞれ実用化に向けて研究が進んでいる。

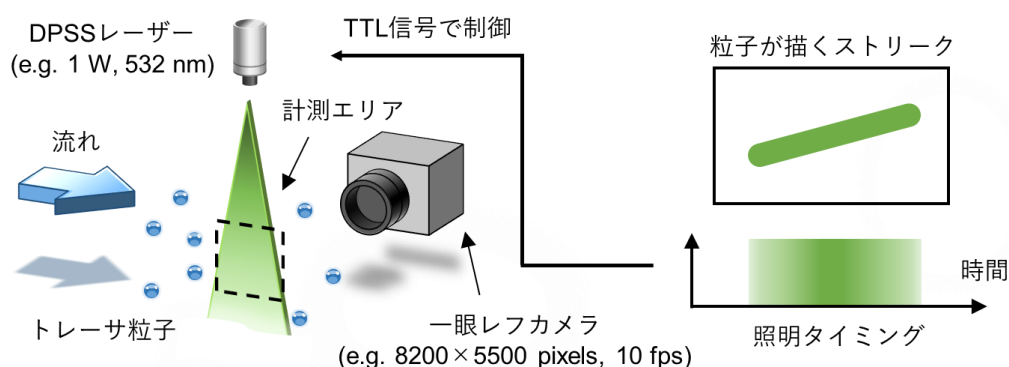


図 1.3 PSV の一般的なセットアップ

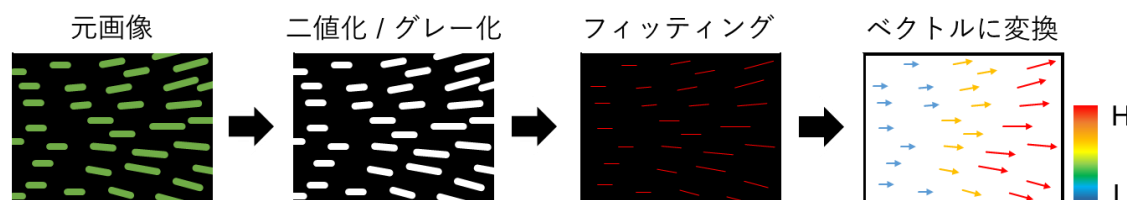


図 1.4 PSV の典型的な解析の流れ

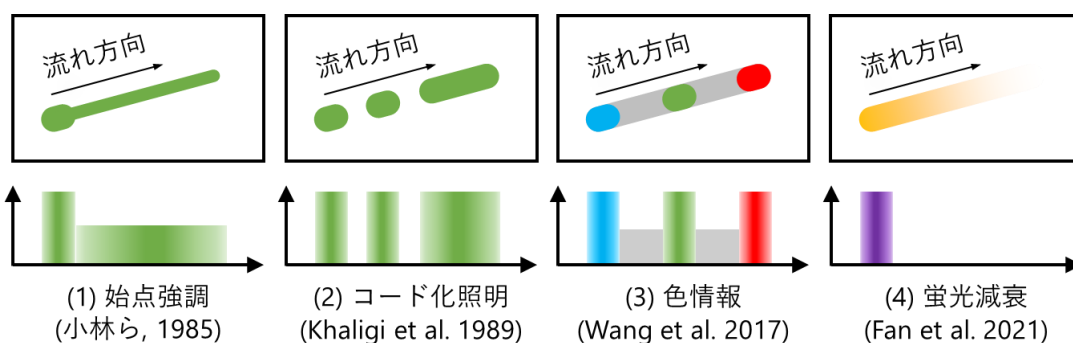


図 1.5 ストリークの典型的なコード化法

1.3 研究目的

ここまで述べたように、PSV は PIV に比べて 16 倍以上の空間ダイナミックレンジをもち、また 1/10 以下のコストで導入できるほどの経済的優位性をもつ。一方、計測可能な最小速度と最大速度との比（これを速度ダイナミックレンジと呼ぶ）は PIV に対して 1 桁以上小さいと考えられているほか、取得可能なベクトル密度も通常 1 桁程度低い。速度ダイナミックレンジは主に乱流への適用性を示す指標であり、速度変動が大きい流れ場を計測するためには十分大きい必要がある。一般に、PSV における速度ダイナミックレンジと取得可能なベクトル密度はトレードオフの関係にあることが知られているが、この関係を定量的に分析した研究はこれまでになく、また両者を改善するための統一的な規準も存在しない。最近の研究では、いくつかの新しいアプローチに基づくベクトル密度の改善例[31-33]も報告されつつあるが、蛍光トレーサ[31, 32]や機械学習[33]に基づく特殊なセットアップが必要であることから、普遍的な規準を提供するものではない。特に、蛍光トレーサを用いる手法は標準的な PIV のベクトル密度を超える $0.004 \text{ vectors / pixel (vpp)}$ を達成するなど、現時点で最も先進的な技術の 1 つではあるものの、基本的には液体への適用を前提とした方法であるため気流測定には使用できない。

そこで本研究では、最も単純で基本的なセットアップであるコード化照明法（図 1.5 参照）に基づく PSV システムを対象に、ベクトル密度を根本的に改善する手法を提案した。また、ベクトル密度と速度ダイナミックレンジとの関係性を定量化するとともに、本研究で得られた結果から PSV の気流熱量計測への利用可能性について検討することを目的とした。

第2章 特徴点マッチング法を用いたストリーク検出法の利用可能性

2.1 緒言

本章では、ストリーク検出率を改善する目的で提案した特徴点マッチング法と呼ばれる画像認識アルゴリズムを適用した結果を報告する。

2.2 特徴点マッチング法

特徴点マッチング法は物体がもつ特徴点（キーポイントと呼ばれる）に基づいて目当ての物体を探し出す物体検知手法である。特徴点とはその物体固有の特徴を有する局所的な部位のことであり、回転や変形、拡大縮小、輝度変化、あるいはピントずれなどに対して堅牢なことが要求される。多くの場合、エッジやコーナーなどが特徴点に該当すると考えられており、特徴点を見つけ出してその座標を取得するまでの過程を特徴点抽出あるいは特徴点検出などと呼ぶ。各特徴点はそれぞれ固有の特徴を有しており、これを特徴量としてベクトルやバイナリコードの形式で定量的に管理する必要がある。特徴量を定量化する過程は特徴量記述などと呼ばれ、特徴点抽出と合わせて様々なアルゴリズムが提案されている。特徴量記述が完了すれば、あとは目当ての物体がもつ各点の特徴量と探し出す領域にある様々な物体がもつ特徴量との類似度を計算していき、類似度の高い特徴点同士を対応付けることで物体検知が完了する。

本研究では流れ場の可視化画像からストリークを検出することを目的として、数多くあるアルゴリズムの中から KAZE アルゴリズム[34]に注目した。KAZE は従来手法の SIFT や SURF に比べ物体の境界を見失いにくいアルゴリズムである。この特性は KAZE で採用されている非線形拡散フィルタによるものであり、このことから特に回転や拡大縮小などに対して極めて高い耐性をもつことが報告されている。

図 2.1 にコード化照明法によって撮影された可視化画像から、KAZE アルゴリズムを用いてストリークを検出するための一連のプロセスを示す。最初のステップでは二値化された可視化画像とモデル画像を KAZE に入力し、特徴点の抽出と特徴量の記述を行う。ここで、モデル画像とは可視化画像から任意の軌跡を 1 本手動で抽出した画像のことである。次に、モデル画像中の特徴点と可視化画像中の各特徴点との類似度を特徴量の距離（L2 ノルム）として計算する。ここでいう距離とは特徴点同士の座標から求めた位置としての距離ではなく、2 つの特徴点があるそれぞれの特徴量についてこれを多次元特徴空間におけるベクトルとして表現した際のベクトル間の距離であることに留意せねばならない。こうして求めた距離に基づき、可視化画像中の全特徴点の中から 1~ k 番目にモデル画像の特徴点との距離が近い（特徴が類似している）ものに注目し、この中からどの軌跡に属する特徴点が多く含まれているかを多数決により調べ、多数派の軌跡にモデル画像中の特徴点を分類することでマッチングが完了する。このような手法は k 近傍法（ k -nearest neighbor, kNN）と呼ばれ、データの分類によく使用されるアルゴリズムである。本研究では $k=2$ とし、実際に計算する際には、FLANN（fast library for approximate nearest neighbors）と呼ばれる近似最近傍計算用高速ライブラリを用いることで高速化した。検出された軌跡を可視化画像中から消去し再度 k 近傍法を繰り返すことで逐次的に軌跡検出が進み、理想的には可視化画像中から全ての軌跡を検出することで処理が終了する。最後に、各軌跡の第一軌跡（短い軌跡）と最終軌跡（長い軌跡）から重心座標を取得し、この間の距離を所要時間で除することで速度ベクトル場を知ることができる。

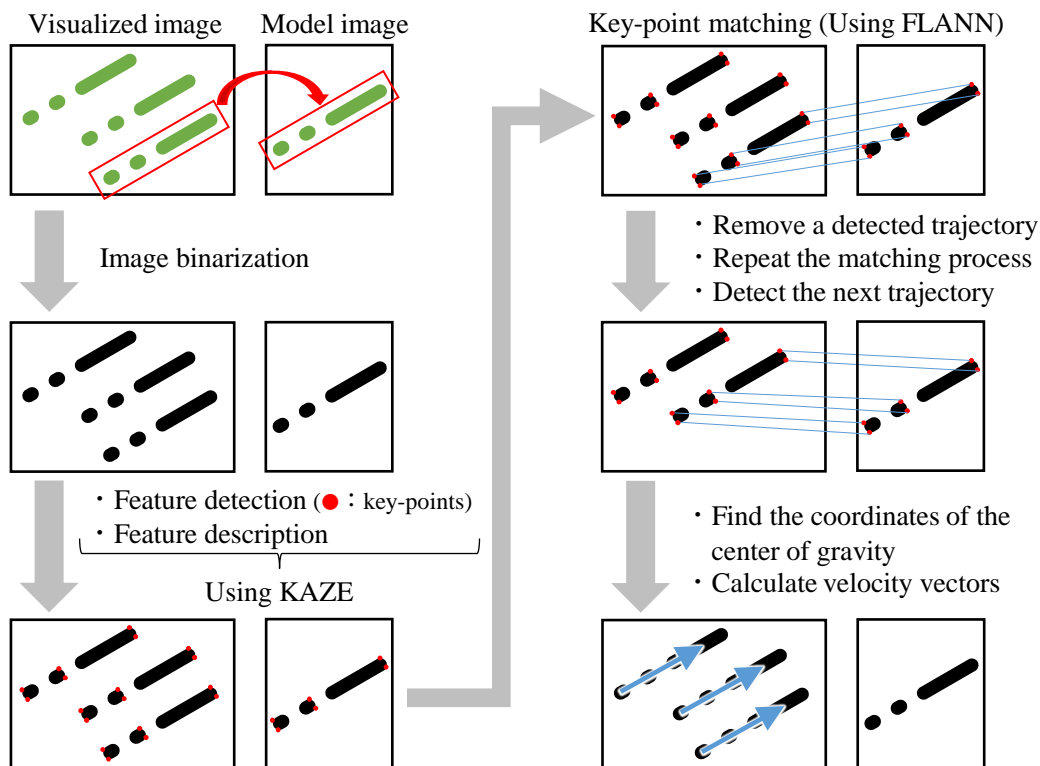


図 2.1 特徴点に基づくストリーク検出の流れ

2.3 人工画像

特徴点に基づくストリーク検出法の検出性能を検証するためには、様々なストリーク密度下における検出率を明らかにせねばならない。しかし、実験的なアプローチによりそのような可視化画像を一々用意するのは技術的にも時間的にも容易でなく現実的ではない。そこでコンピュータによりストリークを模擬する人工画像が用いられた。

図 2.2 に人工画像生成の手順を示す。最初のステップでは、トレーサ粒子の初期位置 (x_0, y_0) を乱数 (メルセンヌ・ツイスター) によって決定する。次に、流れ場の画像上での速度に基づいて、単位ステップ数あたりの変位をサブピクセル精度で計算し、トレーサ粒子をわずかに移動させる。そして、トレーサ粒子が描く完全なストリークを得るために、これらのプロセスを合計ステップ数 T だけ繰り返していく。この一連の処理をすべてのトレーサ粒子について同様に計算することで、最終的なストリーク画像が得られる。ここで、計算に用いられる画像上での速度は、任意の関数または計算流体力学 (CFD) ソフトウェアによって計算された瞬間的な 2 次元流れデータによって定義されるため、時間的な変動は含まず、定常流とみなされなければならないことに注意が必要である。最後に、レイトラッキング法に基づく 3D コンピュータグラフィックスソフトウェアである POV-Ray Version 3.7 を用いてストリークをレンダリングし、図 2.3 に示すような人工画像を作成する。なお、POV-Ray における画像生成のためのいくつかの重要なパラメータは、経験的に決定された。具体的には、カメラタイプは *orthographic*、粒子半径は 1.5 pixels、そしてアンチエイリアスは有効に設定されている。また、光源の種類は平行白色光 (color RGB 1.0) で *shadowless* とした。

検証のために用意された人工画像は合計 33 枚あり、それぞれの画像はストリーク長さ r と相対変位 ρ_r が異なる。ここで相対変位とはストリーク長さ r や画像面積 A によって正規化されたストリーク数 N を意味する無次元量であり、次式で与えられる。

$$\rho_r = r \sqrt{\frac{\pi N}{A}}. \quad (1)$$

性能検証の方法は極めて単純で、各条件下の画像に対して特徴点に基づくストリーク検出処理を行うことで、ストリーク検出数や検出率の特性を分析した。

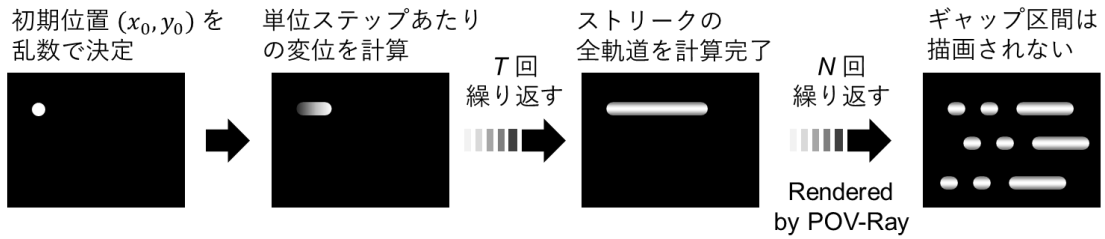


図 2.2 人工画像の生成方法 (T はステップ数, N はストリーク数)

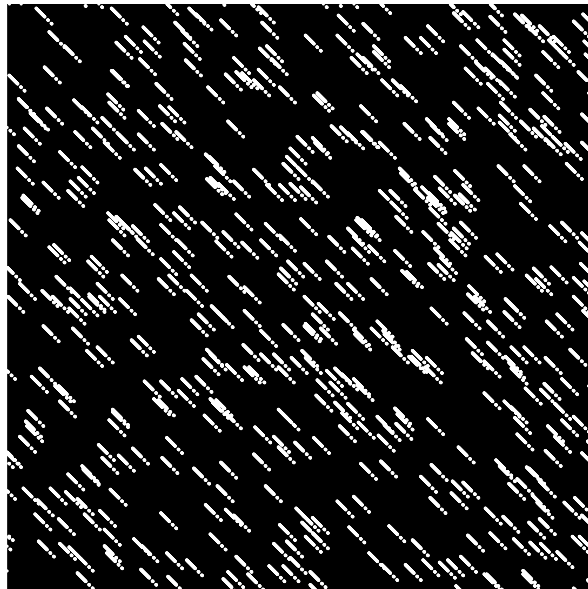


図 2.3 人工画像の例

(画像面積: 500×500 pixels, ストリーク面積: 21.2×3 pixels², $\rho_r = 0.175$)

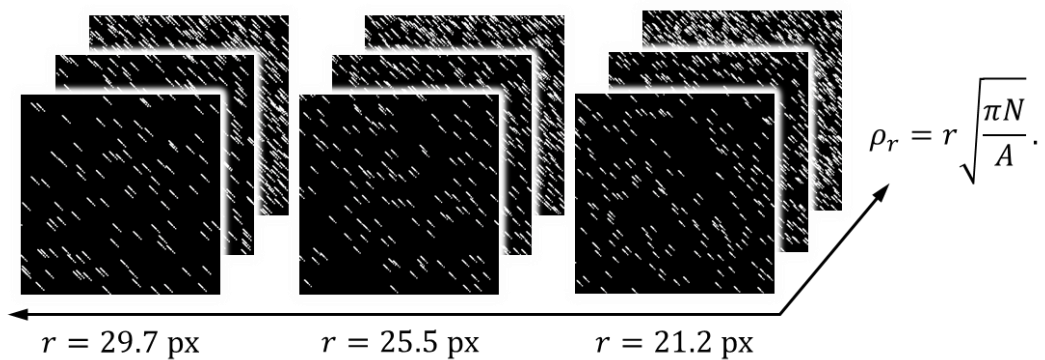
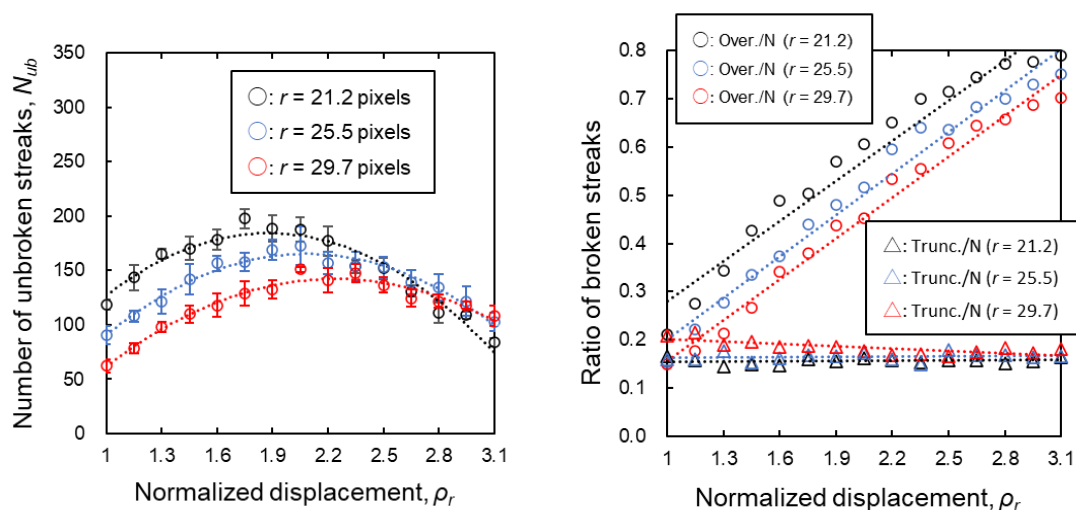


図 2.4 人工画像の生成条件

2.4 非破壊ストリーク数

特徴点に基づくストリーク検出法の性能評価を行う前に、人工画像のデータを用いて重複や切断（画像からはみ出すこと）による破壊を回避し形状を維持していたストリークの数とその全体に占める割合について調査した。図 2.5 に示す結果によると、非破壊ストリーク数は相対変位によって変動し $\rho_r = 1.75$ 付近で最大化されることが明らかになった。この結果は適切な条件下（ストリーク長さと相対変位の組み合わせ）において非破壊ストリーク数が最大化されることを示しており、すなわちトレーサ数密度と照明時間の設定には最適値があることを示唆するものである。また、重複率と切断率についてもそれぞれ相対変位に対する挙動が明らかとなり、特に重複は線形的な増加傾向が同定された。



(a) 非破壊ストリーク数

(b) 項目別の破壊頻度

図 2.5 相対変位がストリーク破壊数に与える影響（一様流）

2.5 検出性能の評価

本研究で提案した特徴点に基づくストリーク検出法の性能を評価するため、ストリーク長さ r と相対変位 ρ_r （どの画像も面積 A と長さ r は一定であるから、つまりストリーク数 N ）が異なる一様流の人工画像を検証用画像として用いた。図 2.6 は、相対変位が検出数と検出率に与える影響を示している。この結果から、ストリーク長さは検出率にほとんど影響しない一方で、検出数は相対変位の影響を受け、特にその最大値がシフトする傾向が明らかになった。それぞれの最大値は 208 本、167 本、および 122 本であり、ベクトル密度に換算すれば 8.32×10^{-4} vpp、 6.72×10^{-4} vpp、および 4.88×10^{-4} vpp である。標準的な PIV のベクトル密度は約 1.00×10^{-3} vpp とされており、ストリーク長さの大きい条件での検出性能はやや不足することが見てとれる。一方で、 $r = 21.2$ pixels の条件では PIV の標準値に近いベクトル密度を達成しており、概ね良好な結果といえる。

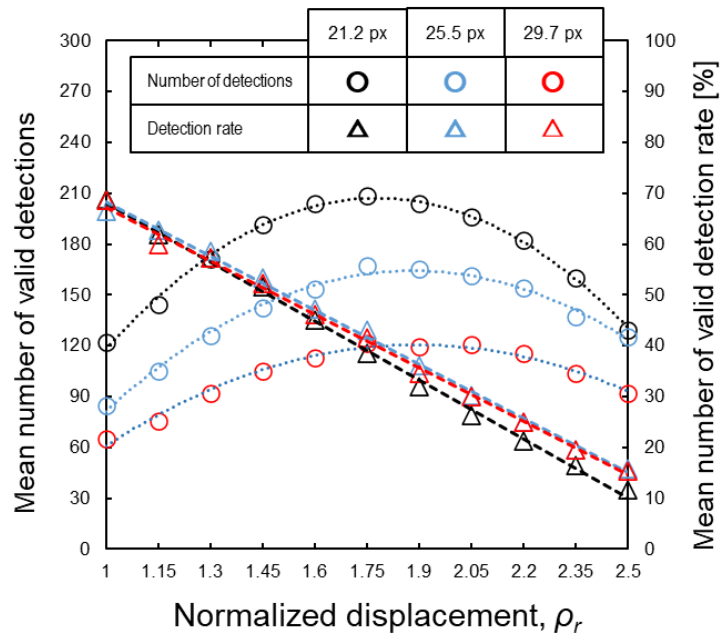


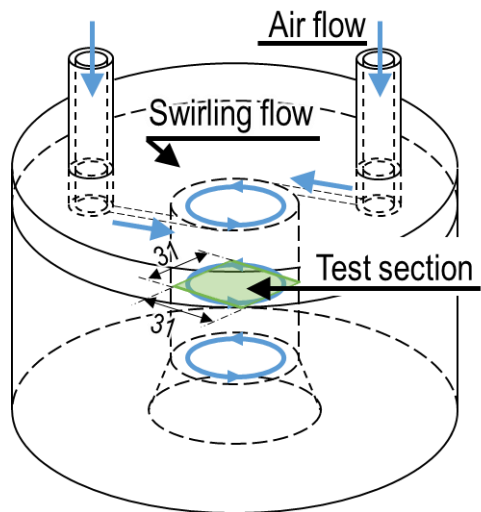
図 2.6 相対変位がストリーク検出数に与える影響

2.5 利用可能性の検討

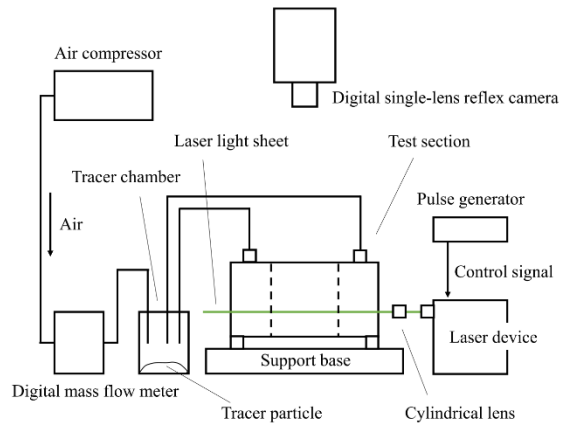
人工画像を用いた評価によると、一様流では最大で 8.32×10^{-4} vpp のベクトル密度を達成しているが、これだけでは実用性についての評価は十分でない。ここでは、実際の流れ場への適用性を評価するために旋回気流場を対象とする可視化画像を用いて検出性能を評価した結果について説明する。図 2.7 には計測対象となった内部に旋回気流を有するアクリル製デバイスと、実験システム全体の概略図を示す。

計測エリアは $31 \text{ mm} \times 31 \text{ mm}$ の領域で、デジタル一眼レフカメラを用いて $4000 \times 4000 \text{ pixels}^2$ (ISO: 6400, シャッタ速度: 1/60 second) の画像として撮影された (図 2.8a)。光源には TTL (Transistor-Transistor Logic) 信号によってコード化照明として制御された DPSS レーザー (波長: 532 nm, 出力: 1000 mW, 厚さ: 3 mm) が用いられ、トレーサ粒子には直径 $10 \mu\text{m}$ 程度の黒鉛微粒子が使用された。空気流量はデジタル質量流量計によって 5 L/min に維持されている。

図 2.8b に示す検出結果では、正しく検出されたストリークの第一ドット部とライン部の重心の間に青い矢印が引かれている。なお、これらの画像は複数の結果画像から抽出した正しい青矢印を合成したものであり、誤ベクトルは目視により手動で除去されている。ストリークは背景減算処理によって鮮明化されているが、二値化処理中に形状が破壊されたストリークもいくつか存在するため不鮮明なストリークも目立っている。このようなストリーク形状の一部が破壊されているため検出されることはなかった。ストリークの検出率は約 60% を達成しており決して低い水準ではないものの、検出数は 160 本でありベクトル密度に換算すると 1.00×10^{-5} vpp と標準的な PIV に比べても 2 桁も低い結果となっている。ただしこれは、検出アルゴリズム側の問題ではなくストリーク数を極端に少なく設定したことが原因と考えられる。これらの実験的な問題については、図 2.6 で得られた結果に基づいて適切なストリーク数密度に設定しなおすことで大幅に改善できると期待される。また、本研究で用いた照明コードは経験則に基づいて決定されており、結果として得られるストリーク長さについてもその最適値を選んだわけではない。したがって、これら実験パラメータの最適決定法を見出すことが次に重要な課題であることが示唆された。

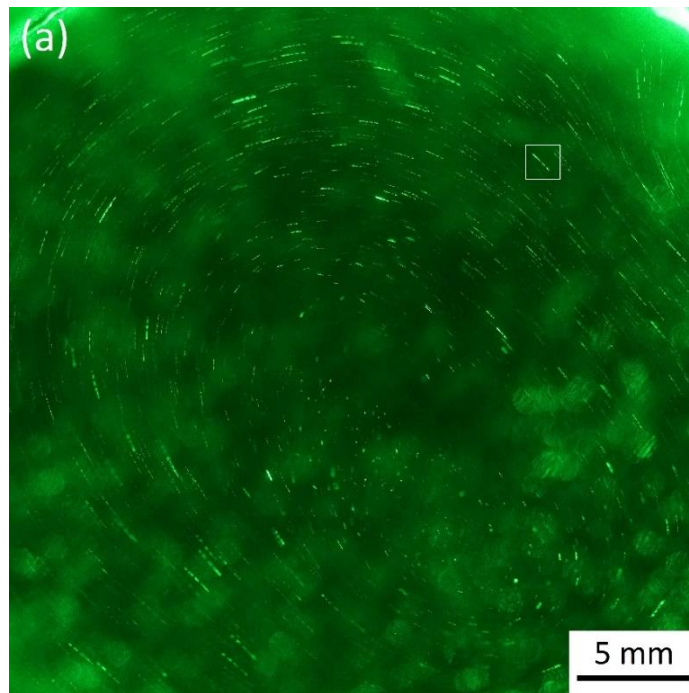


(a) 計測対象

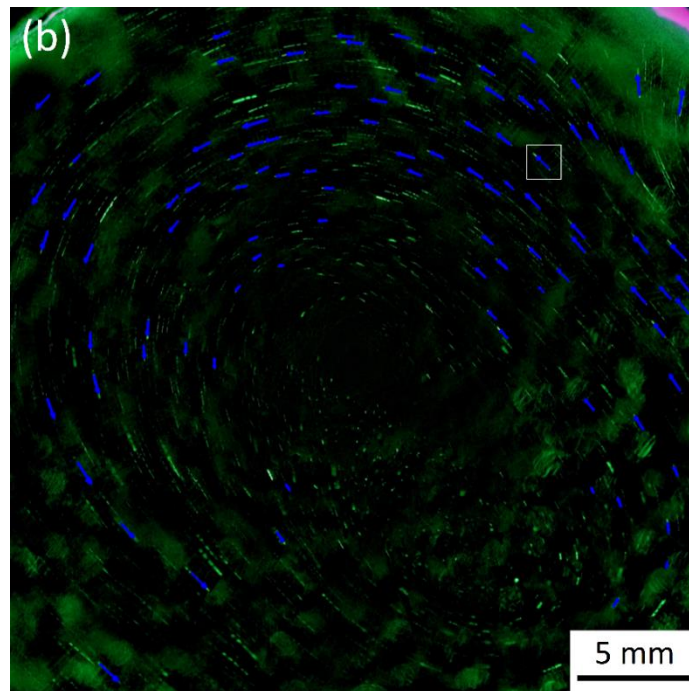


(b) 実験装置の概略図

図 2.7 可視化実験のセットアップ



(a) 可視化画像



(b) 検出結果

図 2.8 旋回気流場への適用結果

2.6 結言

本研究は、画像認識技術として既に成熟している特徴点ベースのマッチング手法をストリーク検出に利用できるかを調査したものであり、人工画像を用いた評価と実際の旋回気流を用いた利用可能性の検証が実施された。主な結果として次のことが明らかになった。

- (1) 正規化されたストリーク数密度として相対変位なる無次元量をパラメータとすることで、ストリーク破壊頻度の変化曲線が定量化された。その結果、 $\rho_r = 1.75$ 付近で非破壊ストリーク数が最大化されることが明らかになった。
- (2) 人工画像（一様流）を用いた評価によって、特徴点に基づくストリーク検出法の検出性能が定量的に分析された。その結果、いずれのストリーク長さにおいても $\rho_r = 1.75$ 付近で検出数が最大化されることが明らかになった。このとき、ベクトル数密度は最大で $8.32 \times 10^{-4} \text{ vpp}$ を達成し、標準的な PIV の値 ($1.00 \times 10^{-3} \text{ vpp}$) に近い結果が得られた。検出数が最大化される条件は、結果 (1) で非破壊ストリーク数が最大化された条件と一致している。したがって、ベクトル密度を最大化するためには、適切なストリーク数を設定することが効果的である。また、その規準として相対変位をパラメータとすることで、異なる照明時間、画像面積の実験に対しても共通の規準を提供できるようになった。
- (3) 実流れへの利用可能性を評価するために、旋回気流場の可視化画像を用いてストリーク検出性能が検証された。その結果、約 60% の検出率を達成したがベクトル数密度は $1 \times 10^{-5} \text{ vpp}$ と 2 桁低い結果となった。しかし、これはストリーク数密度が低すぎたことが原因であり、ストリーク数密度を適切に設定し直すことによって、実際にはベクトル密度を大幅に改善できる見込みがある。

第3章 ストリーク破壊シミュレーションの開発と最適照明時間の推定法

3.1 緒言

前章では、取得可能なベクトル数が最大化される条件としてストリーク数が重要な因子であることを見出した。一方、ストリーク長さ（すなわち照明時間）も同様にベクトル数に影響を与える因子であるものの、これまでの研究では単に短いほうが良いという解釈しか与えず、その特性を定量的に分析した研究は存在しない。これら 2 つの実験的パラメータ（照明時間、ストリーク数）が取得ベクトル数に与える影響を定量化し、その最適値を求めることは本研究の目的であるベクトル密度の改善にとって極めて重要である。

そこで本章では、実験パラメータ（照明時間、ストリーク数）の最適値を特定するために、ストリークの破壊頻度を分析するシミュレーション技術を開発し、最適条件の同定を試みた結果を報告する。

3.2 ストリーク破壊因子の分類

速度ベクトルの取得に成功するためには、ストリーク形状は認識可能な状態で記録される必要がある。しかし、ストリーク形状の破壊頻度はストリーク数密度やストリーク長さの増加とともに増え、2次元流れにおいては図 3.1 に示した 5 つの破壊因子が問題となる。図 3.1a はストリーク同士の重複状態を示し、通常このようなストリークを分離することは困難である。また図 3.1b の切断されたストリークは、どのようなアルゴリズムでも認識することはできない。図 3.1c はドット間のギャップ領域（空白の領域）が潰れた状態のストリークを示している。図 3.1d はライン部が短いために非対称性を失ったストリークを示しており、このような場合は流れ方向を判定できない。図 3.1e はたわんだストリークを示しており、変形が大きいときはパターンマッチングのようなアルゴリズムでは検出できないことがある。以上 5 つの破壊因子を本研究では分析する。

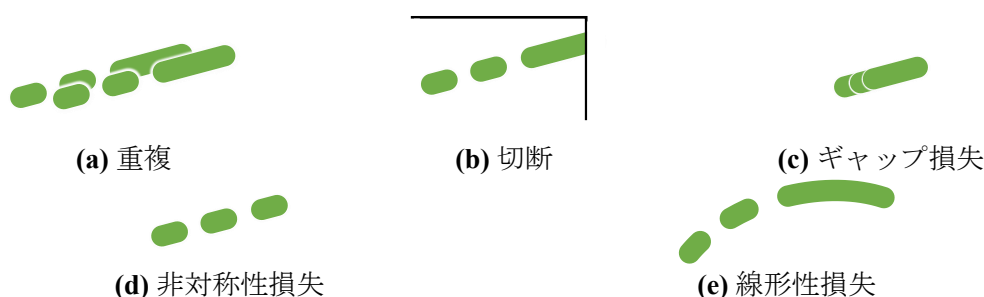


図 3.1 2次元流れにおけるコード化ストリークの典型的な破壊因子

3.3 最適照明時間の定式化

3.3.1 一様流の場合

図 3.2 にコード化されたストリーク形状を特徴づけるパラメータと、対応する照明時間を示す。照明はドット時間 T_1 、ギャップ時間 T_2 、およびライン時間 T_3 で構成され、それぞれの値に応じてドット長さ L_1 、ギャップ長さ L_2 、およびライン長さ L_3 が決定される。

T_2 はギャップ損失の発生に関係する照明時間であり、その最適値はギャップ損失を抑制するために必要な下限値として与えられる。ここで、ギャップ区間の損失が発生する臨界値を K_g 、トレーサ粒子の画像上での速度を V とすると、 T_2 の最適値は次のように定義される。

$$T_{2,opt} = \frac{K_g + D}{V} \quad (2)$$

通常、ギャップ長さは最低でも 1 pixel 以上必要であることから、 K_g の値は 1 pixel に設定することが多い。

T_3 の最適値は非対称性損失が発生しないために必要なドットとラインの長さ比 L_3/L_1 に基づいて与えられる。ここで、長さ比の臨界値を K_a とすると、 T_3 の最適値は次式で定義される。

$$T_{3,opt} = K_a T_1 + \frac{D}{V} (K_a - 1) \quad (3)$$

理論上、ドットとラインの長さ比が 1 よりも大きいときにストリークは非対称性を有するが、実用上は $K_a = 2$ 程度に設定しなければならない。

なお、 T_1 の最適値は認識可能なドットを記録できる下限値を探す実験的な方法によって決定するのが好ましいが、ここでは深く立ち入らない。

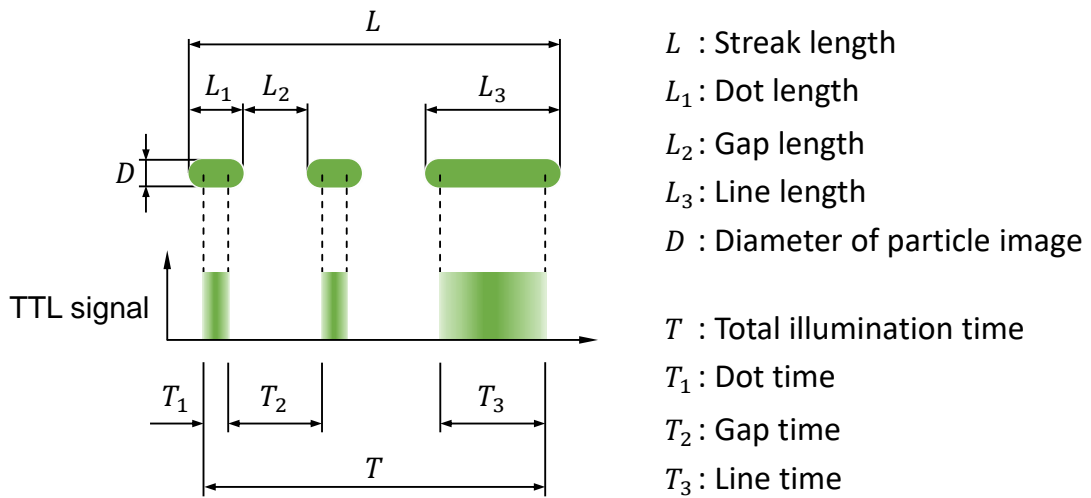


図 3.2 コード化ストリークを特徴づける形状パラメータ

3.3.2 非一様流の場合

非一様流の場合、 T_2 と T_3 の最適値を理論的に決定することはできず、速度 V をパラメータとした最適化問題になる。ここで、流れ場の平均速度 V_{mean} で正規化された速度パラメータを用いると流れ場ごとの評価がしやすいことから、次の無次元量が定義される。

$$c_v = \frac{V}{V_{mean}} \quad (4)$$

本研究では、ストリーク数 N と正規化速度 c_v をパラメータとした 2 次元ストリーク破壊シミュレーション技術によって、認識可能な形状を維持しているストリーク数が最大化される条件 $(c_{v,opt}, N_{opt})$ を探した。対象とする流れ場はクエット流、ランキン渦、およびカルマン渦とし、2 つのパラメータは $c_v = 0.2 \sim 1.2$ 、 $N = 100 \sim 1300$ の範囲で変化させた (図 3.3)。また、速度ダイナミックレンジを検証するために、速度の異なる 4 種類のクエット流が用いられた。各流れ場の詳細は表 1 に示すとおり。

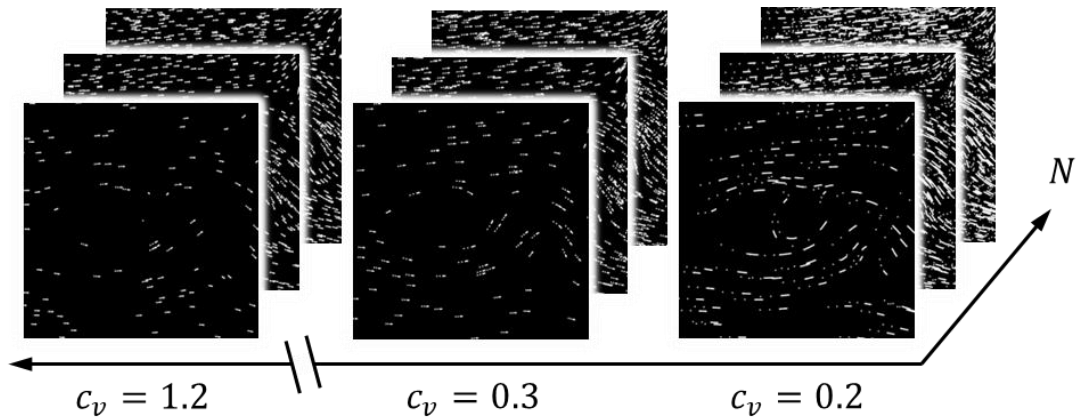


図 3.3 人工画像の生成条件

表 1 流れ場の詳細

Flow field	V_{mean} (pixel/step)	V_{min} (pixel/step)	V_{max} (pixel/step)
Karman	0.11	0	0.20
Rankine	0.13	0	0.20
Couette 1	0.075	0	0.15
Couette 2	0.15	0	0.30
Couette 3	0.175	0.1	0.25
Couette 4	0.125	0.1	0.15

3.4 ストリーク破壊シミュレーション

図 3.1 に示した 5 つのストリーク破壊頻度を集計するために、破壊をシミュレーションする技術が開発された。5 つのうちギャップ損失と線形性損失は 3.3.1 で述べた臨界条件を用いて検出し、その他の破壊は幾何学的条件に基づいて検出できる。

図 3.4 に粒子像の直径 D とストリーク長さ L に基づく重複検出エリアを示す。初期位置 (x_0, y_0) と最終位置 (x_f, y_f) を結ぶ中心線が、他のストリークの重複検出エリアに侵入したときに重複が検出される。ここで、 D は重複検出エリアを広げる要因となることから重複頻度を正確に評価するためには、実験画像で得られた粒子径と一致させる必要がある。

図 3.5 は、画像面積 A_i 、余白 M 、粒子像径 D によって決定される切断検出エリアを示す。切断はストリークの中心線がこの切断検出エリアに侵入したときに検出される。ここで、画像領域の境界を横切るストリークをシミュレーションで再現するためには余白 M を設定する必要がある。したがって、 M の値はストリークの長さ程度に設定しておく必要がある。 M が大きすぎる場合、画面外での切断回数が過剰にカウントされるため正しく評価できなくなる。

図 3.6 は非線形ストリークのたわみモデルであり、線形性損失はストリークの最大たわみ量 d_{max} が閾値 k_d より大きい場合に検出される。たわみ d_{max} は点 (x_0, y_0) と (x_f, y_f) を結ぶ直線までの距離であり、最大たわみ座標 (x_d, y_d) はシミュレーションデータから求めることができる。最大たわみ d_{max} は次式で計算される。

$$d_{max} = \frac{|ax_d + by_d + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (5)$$

ここで、 a , b , c は以下のとおり.

$$a = \frac{y_f - y_0}{x_f - x_0}, b = -1, c = \frac{y_f - y_0}{x_f - x_0}x_0 + y_0 \quad (6)$$

なお、ストリークの長さによっては非線形性から線形性に移行する可能性があるため、線形性の評価に曲率を使用することは好ましくない. また、 D , L , d_{max} の値を正確に決定するためには、これらの値をストリークシミュレーションのプログラムから数値として直接取得する必要がある. POV-Ray で生成した人工画像から画像認識によってこれらの値を求めると、測定誤差が含まれるため正確な評価ができなくなる.

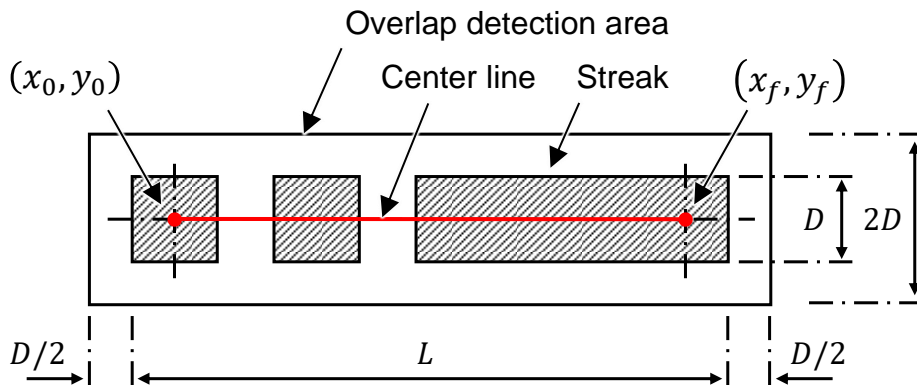


図 3.4 重複検出エリア

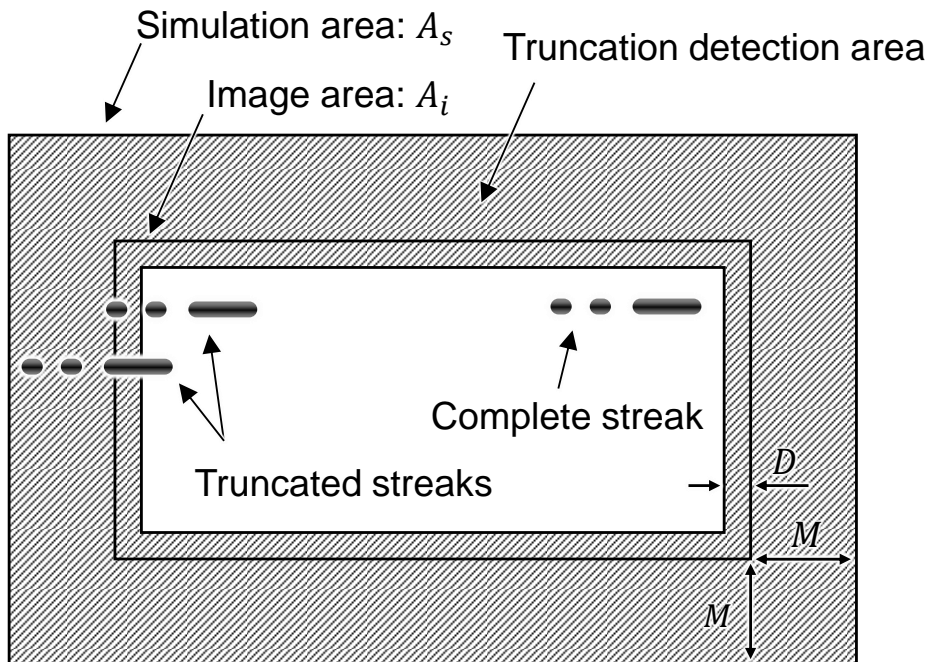


図 3.5 切断検出エリア

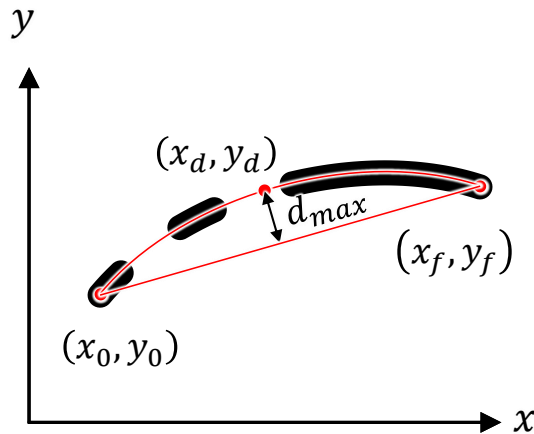
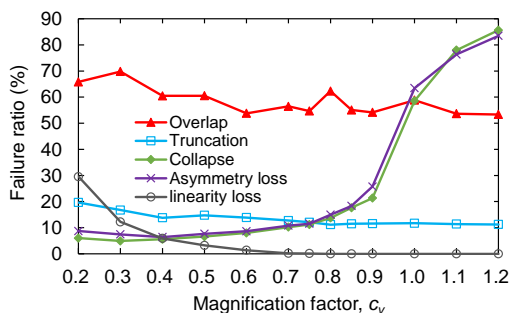


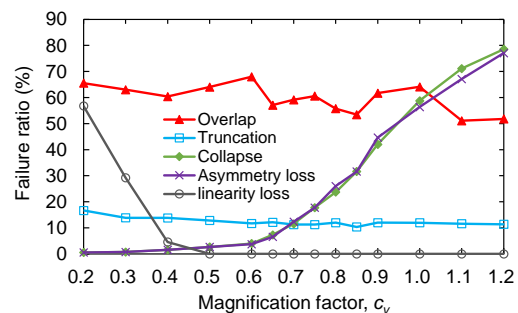
図 3.6 ストリークのたわみモデル

3.5 破壊頻度の分析

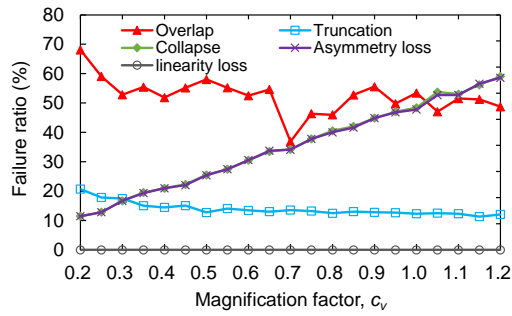
5つに分類されたストリーク破壊因子の特性を明らかにするために、2次元ストリーク破壊シミュレーションで得られた結果から各項目の発生頻度を分析した。図 3.7 には各項目の発生割合と、そのときの正規化速度パラメータ c_v との関係を示す。重複、切断、および線形性損失（たわみ）の抑制には、 c_v を大きめに設定することが効果的である一方、ギャップ損失と非対称性損失の抑制には c_v を小さく設定せねばならないことが示された。また、ギャップ損失と非対称性損失の変化はほとんど一致しており、カルマン渦では $c_v = 0.9$ およびランキン渦では $c_v = 0.6 \sim 0.7$ 以降で指数的に増加する傾向がみられた。これらの結果を考察するために、カルマン渦とランキン渦における速度分布を図 3.8 示す。カルマン渦では正規化速度 $c_v = 0.9$ 以上 1.0 未満の速度領域が突出して多く、またランキン渦では $c_v = 0.6$ 以上の領域が大部分を占めている。いずれの流れ場においても、速度分布でビンが急増する地点の c_v と図 3.7 でギャップ損失や非対称性損失が急増するときの c_v がおおむね一致しているが、これは式 (2) および (3) が示すようにギャップ損失と非対称性損失は設定した c_v 未満の速度領域では必ず発生し、またそれ以上の速度では発生しないという特性をもつためである。したがって、流れ場の速度分布を知ることによって、ギャップ損失と非対称性損失を抑制するために必要な c_v の値をおおまかに見積もれる可能性がある。



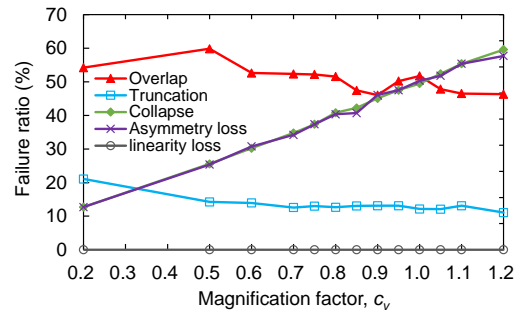
(a) Karman



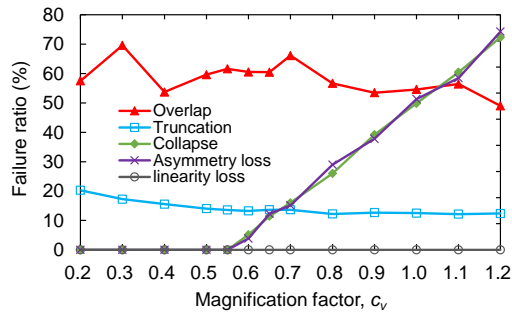
(b) Rankine



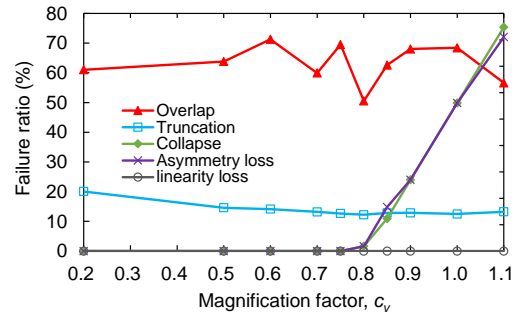
(c) Couette 1



(d) Couette 2

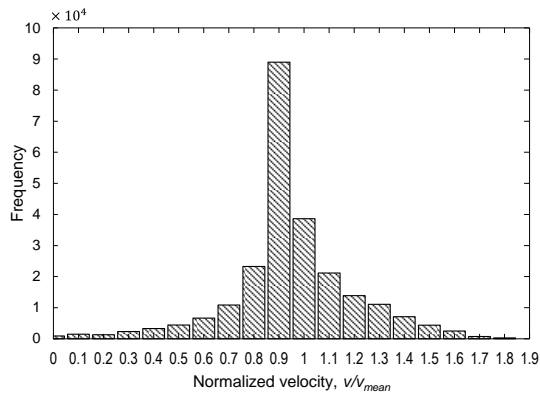


(e) Couette 3

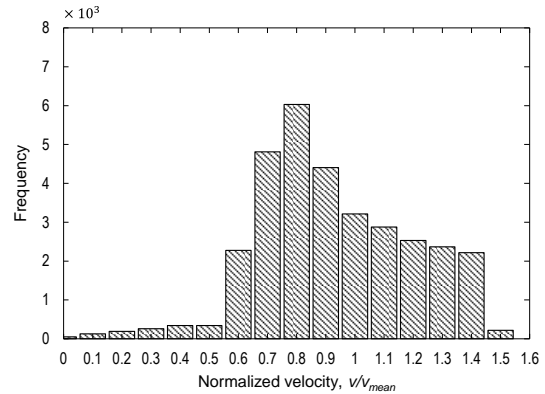


(f) Couette 4

図 3.7 ストリーク破壊頻度と正規化速度パラメータとの関係. 縦軸は全ストリーク数に対する破壊数の割合. 各データは, 非破壊ストリーク数が最大化される条件に相当.



(a) Karman



(b) Rankine

図 3.8 正規化された速度分布. 各ビンには現在の値以上, 次の値未満の範囲のデータが含まれる. 例えば, 1 のビンには 1 以上 1.1 未満のデータが含まれる.

3.6 最適照明時間と最適ストリーク数

表 2 に各流れ場における最適照明時間 $T_{2,opt}$, $T_{3,opt}$ および最適ストリーク数 N_{opt} の結果を示す. 照明時間はシミュレーション内におけるステップ数として表現されており, また T_1 の最適値は実験的なアプローチによって決まるものなので, すべて 1 としたうえで $T_{3,opt}$ が計算されている. これらの結果は正規化速度 c_v とストリーク数 N をパラメータとした 2 次元ストリークシミュレーションにおいて, それぞれの条件における認識可能なストリーク数をカウントすることで得られたものであり, パラメータごとの特性は 図 3.9 および 図 3.10 に示す結果によって分析される.

図 3.9 はパラメータ c_v の変更が認識可能なストリーク数に及ぼす影響を示しており、各データは全 c_v の中で最も認識可能なストリーク数が多いときのデータを基準に正規化されている。各流れ場における最適な正規化速度パラメータ $c_{v,opt}$ はおおむね 0.65 ~ 0.85 の間に分布しており、それ以外の c_v では認識可能なストリーク数が大幅に減少する場合があることが示された。例えば、カルマン渦において認識可能なストリーク数が最大化される条件は $c_v = 0.85$ であるが、パラメータを $c_v = 1.0$ に設定した場合、認識可能なストリーク数は最大値に対して 45 % 以上の減少がみられる。これらの結果は、2 次元ストリーク破壊シミュレーションを用いて照明時間を最適化することで、認識可能なストリーク数を効果的に改善できる可能性を示している。

一方、図 3.10a に示すように各 c_v におけるストリーク数 N の最適値は c_v の値を大きく設定するほど増加する傾向がみられた。これらの傾向を示す線形モデルは各データとのばらつきが比較的大きいものの、 ± 20 % 以内の精度でストリーク数 N を推定できる可能性を示している。また、図 3.10b は無次元化されたストリーク数密度 ρ_r でモデル化した結果を示しており、 ρ_r は次式で定義される。

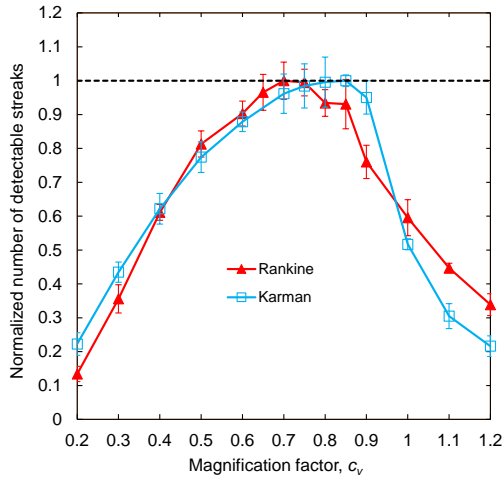
$$\rho_r = L_{mean} \sqrt{\frac{\pi N}{A}} \quad (7)$$

ここで、 L_{mean} 、 A はそれぞれ、ストリークの平均長さ、物体面積などを差し引いた画像の実効面積である。

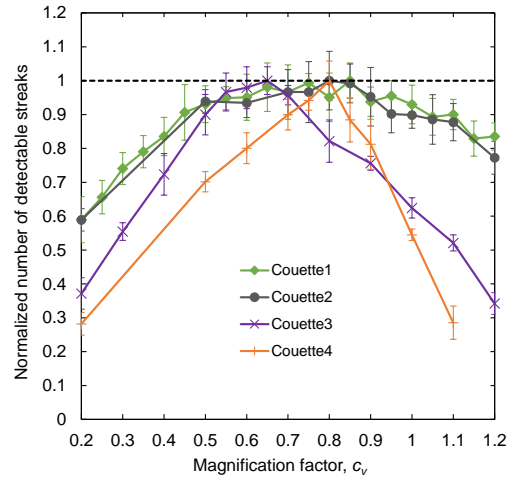
これらの結果は、2 次元ストリーク破壊シミュレーションによる結果から、任意の c_v に対応するストリーク数 N の最適値を推定し、実験的な試行によらず最適なトレーサ粒子数を見積もれる可能性を示している。

表 2 各流れ場における最適パラメータ

Flow field	$c_{v,opt}$	T_1 (step)	$T_{2,opt}$ (step)	$T_{3,opt}$ (step)	N_{opt}	$\rho_{r,opt}$
Karman	0.85	1	43	34	800	1.40
Rankine	0.7	1	43	34	800	1.38
Couette 1	0.85	1	63	50	943	1.50
Couette 2	0.8	1	33	27	800	1.39
Couette 3	0.65	1	35	28	900	1.47
Couette 4	0.8	1	40	32	700	1.30

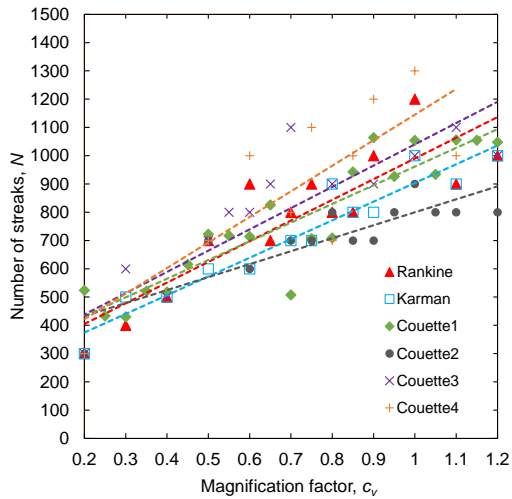


(a) Karman and Rankine vortices

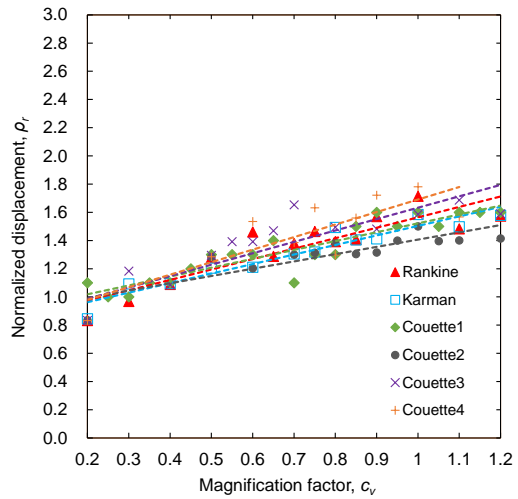


(b) Couette flows

図 3.9 検出可能なストリークの最大数に対する c_v の影響。
ストリークの数 は最大値で規格化されている。



(a) N



(b) ρ_r

図 3.10 検出可能なストリーク数が最大化されたときのストリーク数。

3.7 速度ダイナミックレンジとベクトル密度

図 3.11 には照明時間 T_1 , T_2 , および T_3 と速度 V によって特徴付けられた非加速系におけるストリークの幾何学的パラメータを示す。ストリークは 2 つのドットと 1 つのラインから構成されており、これまでの典型的な解析方法 (端点解析法) ではライン部の端点同士を結ぶ区間 $L_{measure,1}$ の長さから速度ベクトルが計算されていた。一方、ドットとラインの重心間の距離 $L_{measure,2}$ を解析する方法 (重心解析法) も提案されており、流れの加速度を無視できる条件下においてそれぞれの解析法における速度ダイナミックレンジ DVR_1 , DVR_2 は次式で与えられる。

$$DVR_1 = \frac{V_{max}^* T_3 + D}{V_{min}^* T_3 + D} \quad (8)$$

$$DVR_2 = \frac{\frac{1}{2} V_{max}^* (3T_1 + 4T_2 + T_3)}{\frac{1}{2} V_{min}^* (3T_1 + 4T_2 + T_3)} = \frac{V_{max}^*}{V_{min}^*} \quad (9)$$

ここで、 V_{max}^* 、 V_{min}^* はそれぞれ計測可能な最大速度と最小速度であり、認識可能なストリークの中で最も長いものと短いものが得られた地点における速度に相当する。ストリーク破壊因子の特性によれば、設定された c_v よりも遅い領域ではギャップ損失や非対称性損失が発生してしまうことから、計測可能な最小速度は c_v への依存性を持つ。したがって、 V_{max}^* 、 V_{min}^* はそれぞれ V_{max} 、 $c_v V_{mean}$ に相当し、次式が成り立つ。

$$DVR_1 = \frac{1}{c_v} \frac{V_{max} T_3 + D}{V_{mean} T_3 + D} \quad (10)$$

$$DVR_2 = \frac{1}{c_v} \frac{V_{max}}{V_{mean}} \quad (11)$$

図 3.12 はクエット流における取得可能な速度ベクトル密度と速度ダイナミックレンジ (DVR) との関係を示しており、標準的な計測で要求される DVR の基準値 γ が設定されている。通常、 γ は流れ場の最大速度と最小速度との比として設定されるが、Couette 1 と 2 では $V_{min} = 0$ のため無限大に発散してしまう。そこで、本研究では壁面近傍の低速流を無視できる場合を想定し、平均速度 V_{mean} の 0.25 倍を計測すべき最小速度としている。式 (8)、(9) によると、DVR を大きくするには c_v を小さく設定せねばならないが、ベクトル密度を最大化するために必要な c_v とは必ずしも一致しない。この傾向は Couette 1 および Couette 2 において顕著であり、基準値 $\gamma = 8$ に対して、 DVR_1 では 1.7 付近、 DVR_2 では 2.5 付近にベクトル密度のピークがある。したがって、基準値を満たすためにはベクトル密度を犠牲にせねばならず、例えば $DVR_2 = 8$ の条件におけるベクトル密度は約 5×10^{-4} vectors per pixel (vpp) であり約 25% の減少がみられる。一方、Couette 3 および Couette 4 ではベクトル密度と DVR の最大化条件が比較的近い位置にあり、特に DVR_2 ではおおむね一致している。このように、 DVR_2 が DVR_1 よりも 20 ~ 40 % 倍程度大きくなる傾向は全ての流れ場で確認されるが、これは DVR_2 の式 (8) に粒子像径 D の影響が含まれないことに起因する。図 3.13 はベクトル密度が最大化されたときのストリーク画像から、認識可能なストリークのみを抽出した画像である。図 3.13a のカルマン渦では最適化されたストリークによって後流や渦領域の大部分が成功裏に可視化されており、ベクトル密度は 9.70×10^{-4} vpp を達成した。また図 3.13b のランキン渦でも渦中心を除くほとんどの領域でストリークが認識可能な状態を維持しており、ベクトル密度は 9.74×10^{-4} vpp を達成した。これらの結果は、照明時間の最適化プロセスが取得可能なベクトル密度を標準的な PIV や PTV と同程度の水準まで改善できる可能性を示している。一方、他のコーディング法に基づく PSV では、蛍光粒子によって描かれる減衰ストリークを用いてキュベット内の攪拌流を 4×10^{-3} vpp のベクトル密度で計測した例[32]が報告されるなど、PSV におけるベクトル数の高密度化は近年注目されつつある。コード化照明法は潜在的に、1つのストリークから2つ以上のベクトルを取得可

能であることから、現状の2倍以上のベクトル密度を達成する方法も検討されており、理論的、数値的な検証が求められる。

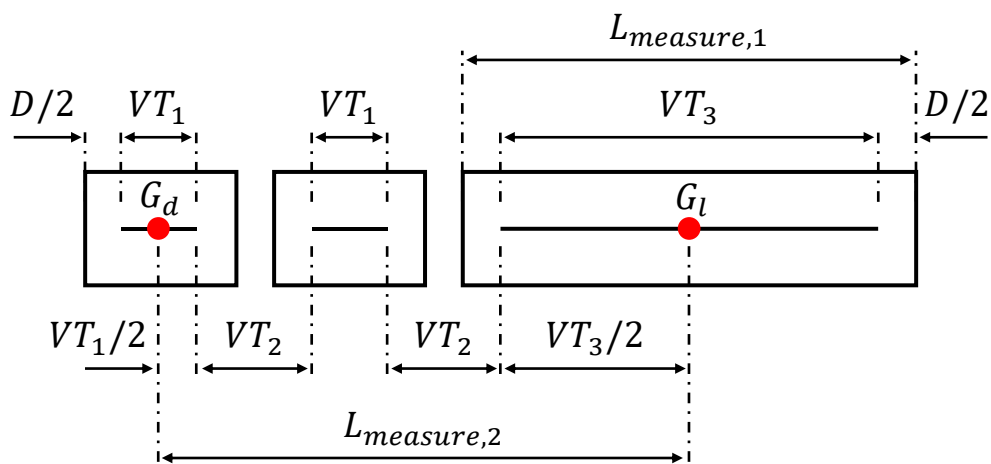


図 3.11 コード化ストリークの計測箇所

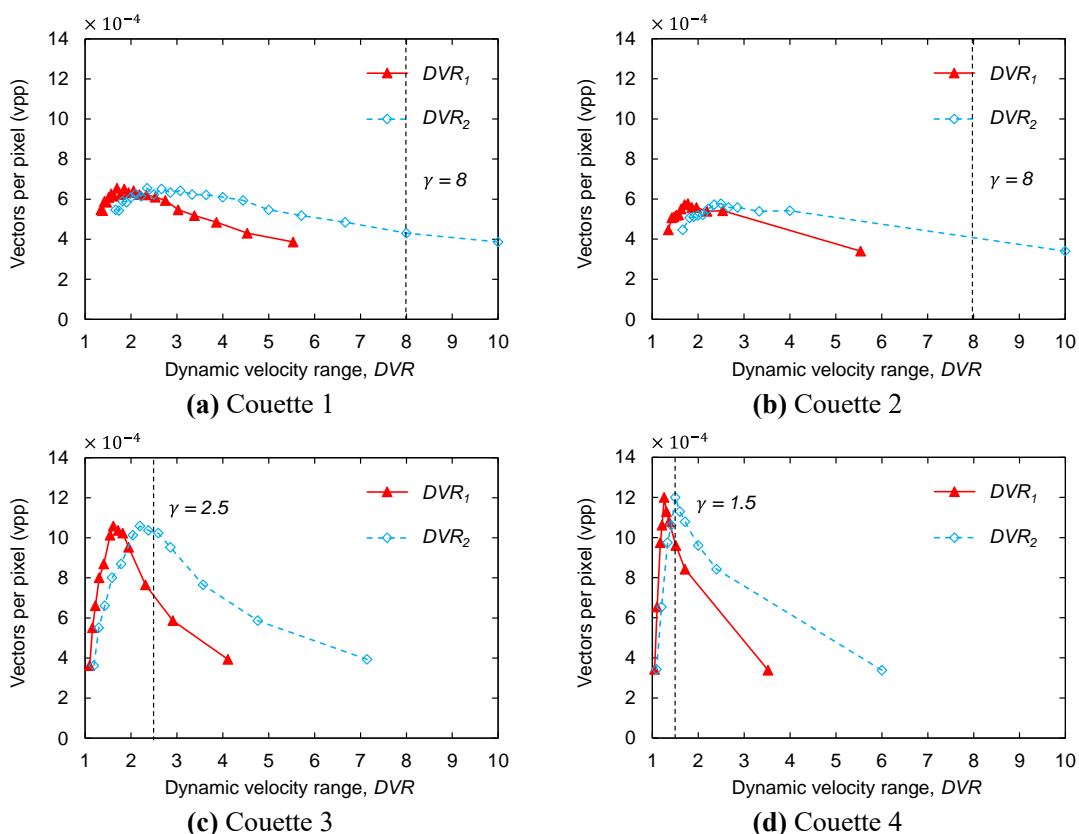


図 3.12 速度ダイナミックレンジと取得ベクトル数の関係。縦軸はベクトル密度 vpp (vectors per pixel)。DVR₁はライン部の長さを解析する一般的な手法のダイナミックレンジ、DVR₂は重心を結ぶ距離を解析する手法のダイナミックレンジ。

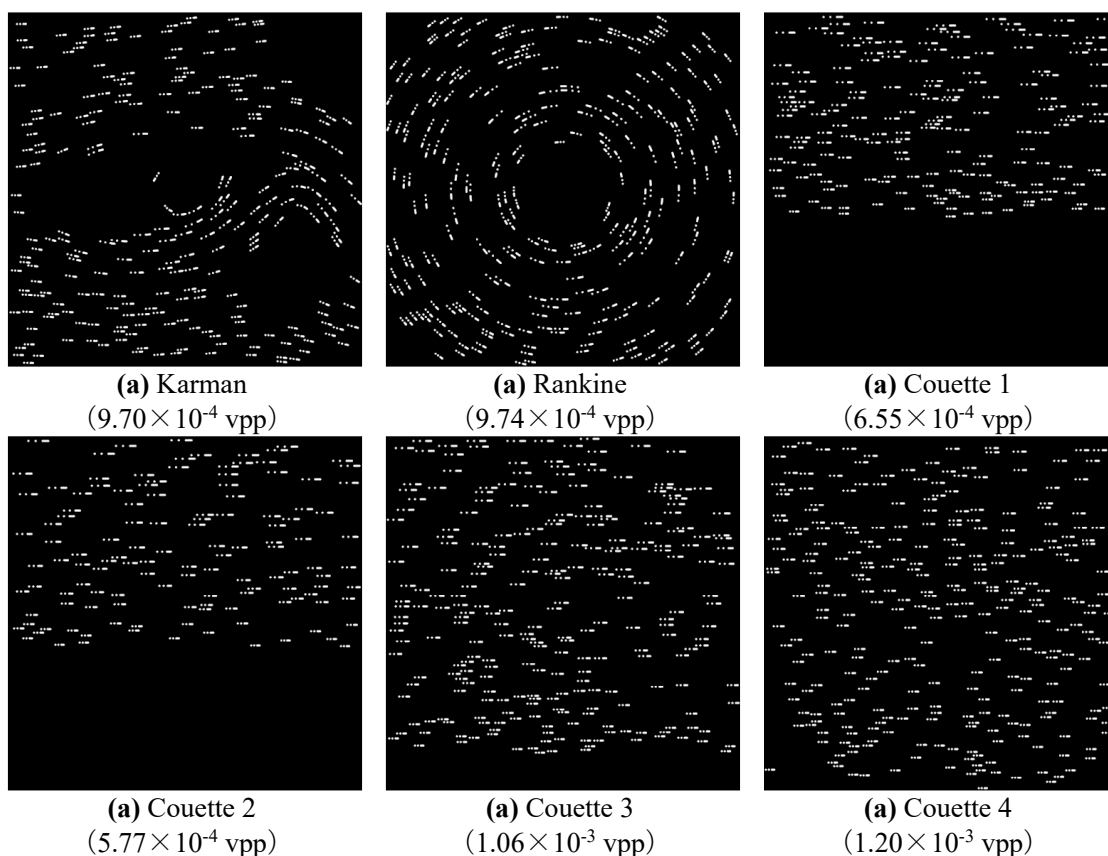


図 3.13 最適条件下のストリーク画像から抽出された非破壊ストリーク

3.8 結言

コード化照明法は照明タイミングの制御のみによってストリークに極性を付与できることから、最もシンプルで汎用性の高い方法であるが、照明時間を適切に設定する必要がある。本研究では 2 次元ストリークシミュレーションを用いた数値的なアプローチによって、ストリーク形状の最適化に関するパラメータや破壊因子の特性を分析し、次のような結論を得た。

- (1) 一様流における最適照明時間は理論的に定式化できるが、非一様流では速度をパラメータとした数値問題になる。非一様流の場合、流れ場の平均速度で正規化された速度パラメータ c_v に基づく 2 次元ストリーク破壊シミュレーションを実施することで、最適照明時間を同定することができる。
- (2) 2 次元流れにおけるストリーク破壊因子は 5 種類に分類でき、 c_v に対する依存性はそれぞれの因子で異なる。重複、切断、および線形性損失は c_v を大きく設定することで抑制できるが、ギャップ損失と非対称性損失を抑制するためには c_v を小さく設定する必要がある。いずれの破壊因子も流れ場の特性に影響され、特にギャップ損失と非対称性損失は速度分布に強く影響される。
- (3) 端点解析法と重心解析法における速度ダイナミックレンジの特性には理論的な差異があり、非加速系の重心解析法では粒子像径の影響が相殺されるため速度ダイナミックレンジの低下が抑制される。

- (4) 照明時間の最適化により認識可能なストリーク数は大幅に改善され、2次元のカルマン渦やランキン渦では標準的な PIV と同じ水準のベクトル密度 (約 1×10^{-3} vpp) が達成された。また、ベクトル密度と速度ダイナミックレンジとの関係から、選択的に両者の特性を考慮した照明設計ができる。

これらの結論は PSV の利用可能性を評価するうえで重要であり、特に結論 (4) はベクトル密度の観点から特定の条件下においてコード化照明法による PSV が PIV と同水準になる可能性を示している。一方、2次元ストリーク破壊シミュレーションではストリークの面外速度成分が考慮されていないことに留意せねばならない。さらに本研究ではストリークの検出プロセスについては議論しておらず、認識可能なストリークは全てベクトルに変換されることを仮定している。今後はストリーク検出アルゴリズムに焦点を当てた研究によって、PSV の利用可能性がさらに評価されることが期待される。

第4章 総括

本論文では、古くから低コストで簡便かつ高解像度な可視化計測技術として知られていた PSV とよばれる可視化計測法に注目し、これを地中熱ヒートポンプの気流熱量計測に適用するうえで問題となる技術的課題について検討した。

第1章では、PSV の基礎事項として計測原理や使用機材について解説し、PIV に比べて空間ダイナミックレンジが高く、優れた経済性をもつことを示した。一方、速度ダイナミックレンジと取得可能なベクトル数については PIV よりも 1 桁以上低いことを指摘し、現状の技術では気流熱量計測への適用およびその高解像度化が困難であることを見出した。そこで本研究では、この 2 つの性能を改善することが最も重要な技術的課題と位置づけ、特に取得可能なベクトル密度を改善する新技術の開発を本論文の目的として示した。

第2章では、画像認識技術の分野で既に成熟した技術として知られている特徴点に基づくマッチングアルゴリズムを、ストリーク検出に適用する試みについて報告した。特徴点とは物体固有の画像的情報をもつ局所的な部位のことであり、回転や変形、拡大縮小、輝度変化、あるいはピントずれが生じた際にも、その情報をできるだけ維持するような特性をもつとされる。したがって、本研究の狙いの 1 つは、従来のようなグレー値分布に基づくフィッティングアルゴリズムを支援するように特徴点を利用することで検出率を向上させ、取得可能なベクトル密度が標準的な PIV と同程度の水準（約 1×10^{-3} vpp）になることを示すことである。

ストリーク同士の重複や切断現象を再現した人工画像（一様流）を用いた性能評価を行い、その結果、最大で 208 本のストリークを検出できることが示され、ベクトル密度に換算して約 8.32×10^{-4} vpp が達成された（ $r = 21.2$ pixels, $\rho_r = 1.75$ ）。また、取得可能なベクトル数はストリーク長さやストリーク数に影響されることを示し、特にストリーク数については相対変位とよばれる無次元量を導入することで、その特性が定量化された。一方、実際の旋回気流場への適用試験では 4000×4000 pixels² の計測エリアから 160 本のストリークを検出できたものの、ベクトル密度は 1.00×10^{-5} vpp と 2 桁小さい結果となった。ただしこれは可視化画像のストリーク数密度が適切でないことが原因とみられ、検出アルゴリズム側の問題ではない。本研究の成果から、特徴点に基づくストリーク検出法について標準的な PIV に近いベクトル密度を実現できる見通しを得たが、可視化画像を撮影する際の実験的なパラメータ（照明時間、ストリーク数）を適切に設定する手法が存在しないことがベクトル密度を下げる新たな問題として浮上した。

第3章では、可視化画像を撮影する際に設定せねばならない 2 つの実験パラメータ（照明時間、ストリーク数）の最適値を求める手法について、ストリークの破壊現象を分析するシミュレーション技術による解決を試みた結果を報告した。本研究ではまず、5 つの破壊因子（重複、切断、ギャップ損失、非対称性損失、線形性損失）を新たに分類し、ギャップ損失と非対称性損失の発生条件からコード化照明のギャップ部とライン部の最適値がはじめて定式化された。一方、非一様流の場合には流れ場の平均速度で正規化された無次元速度パラメータ c_v を導入した破壊頻度シミュレーションをするしかなく、本研究はこの結果について分析することを狙いとした。

シミュレーションによる破壊頻度分析の結果、 c_v に対する依存性はそれぞれの因子で異なることがわかり、ギャップ損失と非対称性損失はある c_v を境界に指数的ないし線形的に急増する傾向があることを明らかにした。また、一連のシミュレーションに基づいてベクトル密度が最大化される条件（ $c_{v,opt}$, N_{opt} ）を特定できることを実証し、2 次元カルマン渦やランキン渦では標準的な PIV に匹敵する 9.70×10^{-4} vpp, 9.74×10^{-4} vpp まで改善できることを示した。ベクトル密度と速度ダイナミックレンジのトレードオフ関係についても傾向がグラフ化され、これまでのような経験則に基づくパラメータ決定ではなく、両者の性能を

選択的に設計した照明コードを利用できる見通しがあった。

以上の成果により、現時点までに（1）特徴点を用いた高密度ストリーク検出技術，（2）破壊頻度シミュレーションを用いた実験パラメータの最適化技術，についてはその利用に目処が立っている。一方，これらの技術を実際の 3 次元的な流れ場へ適用できるかは未だ実証されておらず，今後は水流モデルなどを用いた実証実験を進めることが課題である。

参考文献

- [1] Blum P, Campillo G, Münch W, Kölbl T. CO₂ savings of ground source heat pump systems—A regional analysis. *Renewable Energy*. 2010;35(1):122-127.
- [2] Bayer P, Saner D, Bolay S, Rybach L, Blum P. Greenhouse gas emission savings of ground source heat pump systems in Europe: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012;16(2):1256-1267.
- [3] Hanova J, Dowlatabadi H. Strategic GHG reduction through the use of ground source heat pump technology. *Environmental Research Letters*. 2007;2(4):044001.
- [4] Naldi C, Zanchini E. Effects of the total borehole length and of the heat pump inverter on the performance of a ground-coupled heat pump system. *Applied Thermal Engineering*. 2018;128:306-319.
- [5] Yang W. Experimental performance analysis of a direct-expansion ground source heat pump in Xiangtan, China. *Energy*. 2013;59:334-339.
- [6] Smith GS. (1956). Intermittent ground grids for heat pumps. Seattle, WA: University of Washington.
- [7] Freund EA, Whitlow GS. Earth source heat pumps: characteristics, design, and operation. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part II: Applications and Industry*. 1959;77(6):540-551.
- [8] Goulburn JR., Fearon J. Deep ground coil evaporators for heat pumps. *Applied Energy*. 1978;4(4):293-313.
- [9] Goulburn JR., Fearon J. Domestic heat pump with deep hole ground source evaporator. *Applied Energy*. 1983;14(2):99-113.
- [10] Wang X, Ma C, Lu Y. An experimental study of a direct expansion ground - coupled heat pump system in heating mode. *International journal of energy research*. 2009;33(15):1367-1383.
- [11] Sampei D, Takeda T, Moriya D. Performance Evaluation of Ground Source Heat Pump for Direct Expansion Method — Using Three Parallel Typed Underground Heat Exchanger — . *Trans. of the JSRAE*. 2020;37(3):293-300. (in Japanese)
- [12] Shang Y, Dong M, Li S. Intermittent experimental study of a vertical ground source heat pump system. *Applied Energy*. 2014;136:628-635.
- [13] Qiao Z, Long T, Li W, Zeng L, Li Y, Lu J, et al. Performance assessment of ground-source heat pumps (GSHPs) in the Southwestern and Northwestern China: In situ measurement. *Renewable Energy*. 2020;153:214-227.
- [14] ISO 5151 (2017) Non-Ducted Air Conditioners and Heat Pumps—Testing and Rating for Performance.
- [15] Funatani S, Amano S, Takeda T, Toriyama K. Scanning PIV Method and Its Application to the Calorimetry of Ground Source Heat Pump Systems. *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*. 2017;6(1):48-55.
- [16] Elsinga GE, Scarano F, Wieneke B, van Oudheusden BW. Tomographic particle image velocimetry. *Experiments in fluids*. 2006;41(6):933-947.
- [17] Scarano F. Tomographic PIV: principles and practice. *Measurement Science and Technology*. 2012;24(1):012001.
- [18] Aguirre-Pablo AA, Alarfaj MK, Li EQ, Hernández-Sánchez JF, Thoroddsen ST. Tomographic particle image velocimetry using smartphones and colored shadows. *Scientific reports*. 2017;7(1):3714.

- [19] Shah SP, Mumana N, Barad P, Desai RP, Joshi PS. PIV analysis of opaque flow without using high-tech equipment. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2023;93:102423.
- [20] Minichiello A, Armijo D, Mukherjee S, Caldwell L, Kulyukin V, Truscott T, et al. Developing a mobile application - based particle image velocimetry tool for enhanced teaching and learning in fluid mechanics: A design - based research approach. *Computer applications in engineering education*. 2021;29(3):517-537.
- [21] Chen J, Raiola M, Discetti S. Pressure from data-driven estimation of velocity fields using snapshot PIV and fast probes. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2022;136:110647.
- [22] Adrian RJ. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics. *Annual review of fluid mechanics*. 1991;23(1):261-304.
- [23] Hering F, Leue C, Wierzimok D, Jähne B. Particle tracking velocimetry beneath water waves. Part I: visualization and tracking algorithms. *Experiments in Fluids*. 1997;23(6):472-482.
- [24] Voss B, Stapf J, Berthe A, Garbe CS. Bichromatic particle streak velocimetry bPSV: Interfacial, volumetric three-component velocimetry using a single camera. *Experiments in fluids*. 2012;53:1405-1420.
- [25] Kobayashi T, Yoshitake Y. Development of digital image processing system for pathline pictures. *Trans. of JSME B*. 1985;51:1966-1970. (in Japanese)
- [26] Khalighi B, Lee YH. Particle tracking velocimetry: an automatic image processing algorithm. *Applied Optics*. 1989;28(20):4328-4332.
- [27] Kato F, Shimizu I. Optical Cross-correlation of PTV image under a Deformed Double Exposure. *Transactions of the Visualization Society of Japan*. 2001;21(5):86-93. (in Japanese)
- [28] Feng M, Zhou W, Wang F. Application of particle streak velocimetry based on binocular vision in cascade flow channel. *Proceedings of Global Power and Propulsion Society*. Xi'an, China, 2021;18-20.
- [29] Wang H, Li X, Shao X, Wang B, Lin Y. A colour-sequence enhanced particle streak velocimetry method for air flow measurement in a ventilated space. *Building and Environment*. 2017;112:77-87.
- [30] Wang H, Wang G, Li X. High-performance color sequence particle streak velocimetry for 3D airflow measurement. *Applied Optics*. 2018;57(6):1518-1523.
- [31] Fan L, Vena P, Savard B, Xuan G, Fond B. High-resolution velocimetry technique based on the decaying streaks of phosphor particles. *Optics Letters*. 2021;46(3):641-644.
- [32] Fan L, Vena P, Savard B, Fond B. Experimental and numerical investigation on the accuracy of phosphor particle streak velocimetry. *Experiments in Fluids*. 2022;63(10):165.
- [33] Grayver AV, Noir J. Particle streak velocimetry using ensemble convolutional neural networks. *Experiments in Fluids*. 2020;61(2):38.
- [34] Alcantarilla PF, Bartoli A, Davison AJ. KAZE features. In *Computer Vision—ECCV 2012: 12th European Conference on Computer Vision, Florence, Italy, October 7-13, 2012, Proceedings, Part VI 12*. 2012:214-227. Springer Berlin Heidelberg.

謝辞

本研究に関して、ご指導を賜りました武田哲明教授、船谷俊平准教授に深く感謝いたします。また、討論の場で有益なご助言を賜りました角田博之准教授、鳥山孝司准教授、小野島紀夫准教授、浮田芳昭准教授に深く感謝いたします。そして船谷研究室の皆様にも心から感謝の意を評します。本研究は JSPS 科研費 JP22J13824 の助成を受けて遂行されました。