

空撮ドローンを用いた河川フロントの流速場の広範囲かつ渦解像度推定

杉原, 光都
九州大学大学院総合理工学府総合理工学専攻地球環境理工学メジャー

<https://hdl.handle.net/2324/7179510>

出版情報 : 九州大学, 2023, 修士, 修士
バージョン :
権利関係 :

令和5年度

九州大学大学院総合理工学府

総合理工学専攻地球環境理工学メジャー修士論文

空撮ドローンを用いた

河川フロントの流速場の広範囲かつ渦解像度推定

氏名 杉原 光都

指導教員名 木田 新一郎 准教授

目次

Abstract	3
第1章 はじめに.....	4
1.1 研究背景.....	4
1.2 先行研究.....	4
1.3 研究目的.....	5
1.4 論文の構成.....	5
第2章 観測手法と解析手法	8
2.1 観測手法.....	8
2.1.1 ドローンによる空撮観測.....	8
2.1.2 ADCP による直接観測	10
2.2 空撮画像の前処理	10
2.2.1 口径食の低減.....	10
2.2.2 色の変換.....	10
2.2.3 太陽光の照り返しによるノイズの低減.....	11
2.2.4 射影変換.....	11
2.2.5 平滑化.....	12
2.3 河川フロントの流速場を求める手法	12
2.3.1 特徴点の抽出.....	12
2.3.2 空間的局所最適化法.....	13
2.4 渦を捉えるために使用する可視画像と前処理.....	14
第3章 観測結果と河川フロントの流速場の推定結果.....	23
3.1 観測結果と空撮画像の前処理の結果	23
3.2 河川フロントの流速場の推定結果.....	23
3.3 ドローンの定点保持の精度と推定結果への影響	24
3.4 まとめ	24
第4章 フロント上の渦の高解像度推定	34
4.1 河川フロント上の渦の動きの推定.....	34
4.2 渦の移動速度の抽出	34
4.3 時間経過に伴う渦の移動	35
4.4 考察.....	36
第5章 まとめ	45
参考文献.....	46
謝辞	47

Abstract

沿岸域には、河川水と海水の境界に河川フロントと呼ばれる塩分が急激に変化する境界層が存在する。河川フロントは、数分および数メートルスケールで形状が変化するため、その形状と流れ場の時間変化を把握するには高頻度・高解像度な観測が必要である。これまで空撮ドローンを用いた観測によって流れ場の推定に成功した例はあるものの、カメラを真下に向けた空撮手法であったため撮影範囲が狭く、河川フロントの全体像を把握することが難しかった。また、従来の画像相関法をもとにした流速場の推定ではフロント上の渦の動きまでは捉えることができなかった。そこで本研究では、①空撮ドローンを用いて数秒および数 m スケールで変化する河川フロントを広範囲にわたって観測すること②空撮画像からフロント上の渦の動きを高解像度に推定することを目的とする。

北海道・厚岸湾で観測を実施し、空撮ドローンのカメラを斜め 45 度に傾けることで、近距離を高解像度で捉えつつ、遠方まで広範囲で河川フロントを捉えることに成功した。取得した画像は、空間的局所最適化法を用いることで河川フロントの詳細な流速場の構造を抽出することを試みた。この手法は拡大や回転などの変形に対応することができるのが長所だが、急激な明るさの変化やノイズの影響を受けやすい欠点があるため、前処理として口径食と照り返しによるノイズの低減、そして射影変換による解像度の均一化を行った。明度の空間勾配の大きい点を特徴点として抽出し、流速場を求めたところ、河川フロント上で ADCP による流速の測定結果とほぼ同じ大きさで流速場が推測できることがわかった。

高解像度に得られた渦の動きの特徴を抽出するため、過去の可視画像を用いて河川フロント上の渦の動きを推定した。可視画像データであったため、CIE Luv 色空間に変換し、明るさの情報を抽出し、かつ線形的な色情報として解析を進めた。空間的局所最適化法からは、河川フロントが背景流によって移動している中で渦が形成・移流・消滅している様子が明らかになった。特徴点の位置をもとに抽出した渦の軌跡となる軸上の流速ベクトルの時間変化を求め、その流速ベクトルの分布において流速ベクトルがゼロとなる地点を渦の中心と考えた。渦は反時計周りに回転しており、軸上の流速ベクトルのホフメラー図は、渦の中心がほぼ背景流と同じ早さで流れていることを示していた。ただし、渦が消滅する際は、可視画像で見える渦の形状と流れ場が一致しなくなっていた。空間的局所最適化法を用いることで高解像度な渦の流れ場の抽出が可能であり、渦の寿命（形成から消滅までの時間）をも定量的に評価できることが示唆された。

第1章 はじめに

1.1 研究背景

沿岸域の河口付近では、陸から海へ流出する河川水が河川プリュームを形成する。河川プリュームとは、海水よりも低密度（低塩分）である河川水が、海水の上に層を成して広がる低塩分の水塊のことを指す。河川プリュームは、植物プランクトンが成長に利用する栄養塩が含まれていることが多く、陸から外洋への物質の主要な供給源でもある。また海水との境界線である河川フロントでは、淡水である河川水は海水と混合し、塩分が急激に変化するため、河川フロントでは塩分勾配が大きい。河川フロントでは、河川水が物理的および化学的に変化しており（図 1.1）、このフロント近傍で起こる混合、そしてその動態を理解することは、沿岸生態系の維持と保護の観点からも重要である。

河川フロントは、全長が数百メートル以上にもなり、数秒および数メートルスケールでその形状が変化しながら移動する。河川フロントの動態は非常に複雑であり、その水平・鉛直構造と流れ場の時間変化を実際の船舶を用いた定点観測から捉えることは困難である。したがって、河川フロント上で発生している河川水と海水の詳細な混合過程には未解明な部分が多く、河川フロントの形状とその近傍の流れ場をより詳細に把握できる新しい高頻度・高解像度な観測手法が必要である。

1.2 先行研究

船舶による定点観測は船舶の位置に限定されるため、観測範囲が限定的であり、河川フロントの全体像を捉えることは困難である。一方で広範囲を捉えることが可能な衛星観測では、1km 以下の空間スケールでの観測が可能であるものの、雲域の存在により欠損値になることが多く、時空間解像度も粗いため数 m・数秒スケールで変化する河川フロントの観測には適していない。そこで近年注目されているのが空撮ドローンを用いた河川フロントの観測である。空撮ドローンは、機動的に一度の撮影で数十メートルから百メートルの現象を捉えることができるほか、数 cm 程度の解像度で捉えることが可能である。

空撮ドローンによる海洋観測手法としては、赤外線カメラを搭載した空撮ドローンを用いた海面水温の連続撮影がある。カメラを真下に向け、空撮ドローンが水平方向に移動しながら広範囲に海面水温の観測を実現しようとする試みである（森永, 2018）。オーバーラップ率（画像の面積の重ね合う割合）と撮影時のGPS情報を利用することで、撮影画像を重ね合わせながら約400m²の面積を海面の赤外線画像の取得に成功している。

可視カメラを搭載したドローン観測では、約500m²の範囲、5cm程度の解像度での観測が実現しており、撮影画像の色空間を変換し、空間勾配を計算することで河川フロント周辺の構造の抽出に成功している（石元, 2019）。またRGBデータを活用することで、クロロフィル濃度の空間変化も捉えることも可能なことが示唆された。

さらに阿部（2020）は可視画像の連続撮影データを利用し、画像相関法(Taniguchi et al., 2019)を用いて河川フロントに沿った流速場を数cm程度の高解像度で推定することに成功した。推定した流速は、過去の係留データとも整合的であり、ドローンの定点保持（ホバリング）の精度検証からも妥当であった。しかし、画像相関法では、フロント上の渦の構造など詳細な流速場を推定することまでは実現できていない。

1.3 研究目的

本研究の目的は2つある。1つ目は、ドローン空撮により数秒および数 m スケールで変化する河川フロントを数 cm 程度の解像度、かつこれまでより広範囲で観測することである。2つ目は、ドローン空撮で取得した時間的に連続する画像から、フロント上の渦の流速場を捉えることが可能な高解像度な推定手法を開発することである。

1つ目に関して、従来のドローン観測では搭載しているカメラを真下に向けて空撮する手法が用いられてきた。この撮影手法では撮影画像の解像度がほぼ一定であり、データを補正することなく解析しやすいという利点がある。しかし、一度に撮影できる範囲が縦：150m、横：100m ほどと狭く、全長が数百 m にわたり時事刻々と変形を繰り返す河川フロントの全体像を捉えることが難しいという課題があった。この課題を解決するため、空撮ドローンのカメラを斜めに傾けて遠方まで観測し、より広範囲で河川フロントを捉えることを目指す。カメラを真下に向けた場合と比較して、観測時間の短縮や遠方のフロントの推移をドローンの機体自体を移動させることなく捉えることが可能となる。欠点は斜めで撮影した画像内の空間解像度が一定でないことである。よって流速を推定する際にこれまでの手法を利用するにはまずカメラを真下に向けた時のような画像に変換する必要がある。また撮影時のカメラの傾斜角度が 45 度を超えると水平線が映り込む可能性が高く、解像度の歪みも顕著になるために直下の画像に変換することが困難になる。そこで我々は傾斜角度を 45 度に設定し、斜めで取得する画像を用いた流速推定の検証を北海道・厚岸湾 (図 1.2) にて行った。この海域で観測するメリットとして、過去の観測(石元, 2019)でも示されているように、河川水と海水との間で海色が異なることで河川フロントが視覚的に発見しやすく、画像解析においても捉えやすいことである。

2つ目に関して、これまでの画像相関法を用いた流速推定の成功例はあるが(阿部, 2020)、フロント上で発生しているような細かな擾乱や数 m スケールの渦が回転する流速場までを捉えることができていない。しかし、河川フロント上で発生している渦の動きは、フロントで起こる混合過程と密接に関係しており、より詳細な流速場の情報が不可欠である。そこで、画像から流れを推定する手法として画像相関法とともに広く使われている空間的局所最適化法(Lukas and Kanade., 1981)に着目する。この手法は画像相関法と比べ、効率的かつ詳細な流れ場の推定が可能であることが知られているものの、これまで海洋の流速場推定には用いられていない。

1.4 論文の構成

本論文は全 5 章で構成している。

第 1 章では、沿岸域における河川フロントの特徴とその形状変化の特徴を説明し、これまでの空撮ドローンを用いた河川フロントの観測の試みとその結果を概観した。さらに空撮ドローンのカメラを斜めに傾けることで河川フロントを広範囲に観測すること、そして空撮画像を用いてこれまで捉えることができなかった河川フロント上の数メートルスケールの渦の動きを明らかにすることが本研究の目的であることを示した。

第 2 章では、空撮ドローンを用いた河川フロントの観測手法と取得した画像データから流速場を推定するための手順と手法を詳細に述べる。

第 3 章では、観測結果および解析結果を示し、その結果を考察する。

第4章では、解析によって得られた河川フロント上の渦の動きをもとに、渦の移動速度を抽出する手法を示し、その結果を考察する。

第5章では、各章の結果を総括し、本論文の結論を提示する。そして今後の研究における応用の可能性について論じる。



図 1.1 河川フロントのイメージ。

薄い青色が河川水、濃い青色が海水であり、その境が河川フロントである。

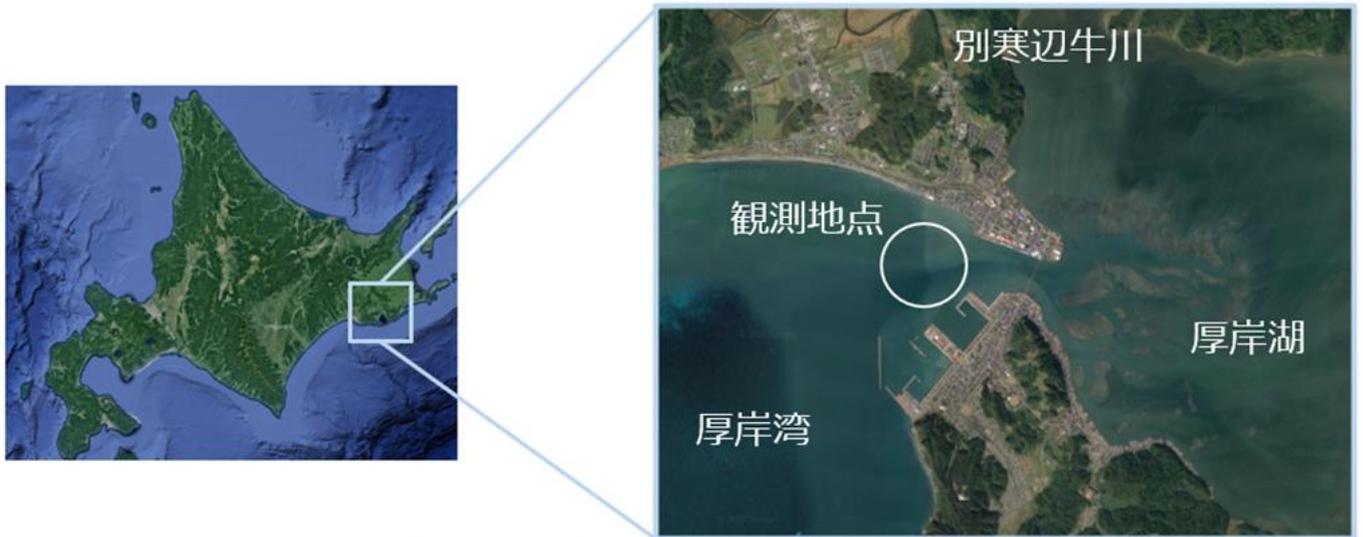


図 1.2 北海道・厚岸湾の位置（左）と、厚岸湾における観測地点（右）（Google Maps, 2024）

第2章 観測手法と解析手法

2.1 観測手法

本研究で実施する観測の目的は、空撮ドローンを用いて河川フロントを広く観測し、その流速分布を高解像度で推定することである。そこで観察と検証を目的に以下2つの観測手法を同時に実施した(図2.1)。1つ目が、河川フロント上空にて空撮ドローンを用いた空撮観測である。2つ目が、ドローンの撮影範囲内において水上ドローンに取り付けた ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler: 多層式ドップラー流向流速計)による水中の流速測定である。

2.1.1 ドローンによる空撮観測

空撮観測には、DJI 社製の P4 Multispectral の空撮ドローンを用いた(図2.2)。P4 Multispectral はドローン上部にはスペクトル日照センサーが搭載されており太陽放射照度の補捉が可能であるため、1日の中で異なる時間帯で観測した際も太陽光の強さの違いを補正することで、一貫したデータ解析が可能である。また、RGB カメラ1台とマルチスペクトルカメラ5台(青/緑/赤/レッドエッジ/近赤外線)が搭載されており、異なる波長帯でのデータを一度の撮影で収集することが可能である。

空撮ドローンは①～⑥の手順に従って観測を実施する。

① 飛行前に操縦者の安全面と周囲の環境条件を確認

② ドローンの操縦には、DJI 社製のアプリケーションソフト「DJI GS Pro」を使用する

③ 機体の設定がビジョンポジショニングであるか確認

定点保持(ホバリング)して連続撮影を行う際、ビジョンポジショニングを使用することで、垂直方向で±0.1m、水平方向で±0.3mの精度で定点保持が可能となる。ビジョンポジショニングシステムの主要パーツは機体の前方と底部にあるが、特に底部のシステムは地表面を検知して機体の水平を保つ機能を持つ。しかし波浪の影響を受けやすいため、海上で使用する場合には機体が傾く可能性がある。海上観測における、この定点保持の精度が推定結果へ与える影響については3.3節で詳しく述べる。

④ 空撮ドローンを離陸させ、河川フロント上へ移動させる

⑤ 上空140mでカメラを斜め45度に傾けて、5秒間隔で連続撮影する

搭載されているカメラは1/2.9インチCMOSで、横方向の大きさ(X_C)が4.97mm、縦方向の大きさ(Y_C)が3.72mm、焦点距離(S)が5.74mmである。よってカメラを真下に向けた場合の空撮画像の横(X_M)、縦(Y_M)の長さは撮影高度(H)を用いて以下の式で求めることができる。

$$X_M[m] = H \times \frac{X_C}{S} \quad (1)$$

$$Y_M[m] = H \times \frac{Y_C}{S} \quad (2)$$

今回の観測では $H=140$ m であることから、式(1)と(2)より取得される画像の X_M は 121 m、 Y_M は 90 m となる。

本観測ではカメラを真下から斜め 45 度上向きに傾けるため、撮影範囲を知るにはさらに縦・横方向のカメラの画角を求めておく必要がある。縦・横方向における画角の半分をそれぞれ θ 、 Θ とすると、図 2.3 に示すように θ 、 Θ は以下の式で求まる。

$$\theta[^\circ] = \tan^{-1}\left(\frac{Y_M}{2}/H\right) \quad (3)$$

$$\Theta[^\circ] = \tan^{-1}\left(\frac{X_M}{2}/H\right) \quad (4)$$

式(3)、(4)より求まったカメラの画角は $\theta = 36^\circ$ 、 $\Theta = 46^\circ$ であった。

カメラを斜め 45 度に傾けた際の縦方向の撮影範囲 Y は、45 度に θ を足した画角で撮影できる範囲 y' から 45 度から θ 引いた画角で撮影できる範囲 y の差で表すことができる (図 2.4)。

$$Y = y' - y = \tan(45^\circ + \theta) \times H - \tan(45^\circ - \theta) \times H \quad (5)$$

式(5)より縦方向における撮影範囲 Y は 202 m となる。一方、画面下部の横方向の撮影範囲 X_B は、

$$l = \frac{H}{\cos(45^\circ - \theta)} \quad (6)$$

を用いて以下の式で表すことができ、

$$\frac{X_B}{2} = \tan\theta \times l \quad (7)$$

X_B は 136m である。また画面上部の横方向の撮影範囲 X_T は

$$l' = \frac{H}{\cos(45^\circ + \theta)} \quad (8)$$

を用いて、

$$\frac{X_T}{2} = \tan\theta \times l' \quad (9)$$

となり、 X_T は 266m である。以上を整理すると、高度 140 m において真下を撮影した場合の撮影範囲は縦：90 m、横：121 m の 10890 m²であり、斜め 45 度の場合の撮影範囲は上底：266 m、下底：136 m、縦：202 m の 40602 m²である。この結果は、カメラを斜め 45 度に傾けて撮影することで一度に撮影できる範囲が真下の場合と比べて約 3.7 倍に広がることがわかり、より広範囲な観測が可能である。

⑥ 離陸点へ帰還

2.1.2 ADCP による直接観測

直接観測では、ハイドロシステム開発社製の水上ドローン・ウルトラハイスピードボート（図 2.5）に搭載した River Pro ADCP（図 2.6）から実施した。水上ドローンを用いた理由は、船より小型であるため数メートルほどの構造を持つ河川フロントに対する機体による流れの影響を軽減し、より正確に流速を測定するためである。River Pro ADCP は浅海域を測定精度：±2 mm/s、分解能：1 mm/s で測定することが可能であり、表層に近い最低 0.12 m の水深から流速の測定が可能である。また高い測定精度が期待でき、空撮画像からの推定する流速場の検証として、信頼性の高い測定結果を得られる。

ADCP を用いた観測手順は以下の通りである。

- ① 水上ドローンに ADCP を取り付け、観測船と水上ドローンをロープで結ぶ（図 2.1）
- ② ドローンの操縦班から上空から確認できた河川フロントの位置を伝えてもらう
- ③ 河川フロント上に水上ドローンを移動させ ADCP による水中の流速測定を行う

2.2 空撮画像の前処理

撮影時のマルチスペクトル画像の波長帯域は、青色波長：450 nm±16 nm、緑色波長：560 nm±16 nm、赤色波長：650 nm±16 nm、レッドエッジ波長：730 nm±16 nm、近赤外線：840 nm±26 nm である。ここで撮影から得られる可視画像は RGB の各色を 256 段階(8bit)で表現するのに対して、マルチスペクトル画像は 65536 段階(16bit)で表現しており、後者の方が色に対する解像度が高いため、マルチスペクトル画像を用いて解析を進める。まず画像解析において次の 2.3 節で述べる空間的局所最適化法を活用して流速を精度良く推定するために必要な画像の前処理の工程を説明する（図 2.7.1）。

2.2.1 口径食の低減

空撮ドローンで捉えた画像中には図 2.7.2 で確認できるような、レンズの形状によって生じる口径食（画像の中心部と周辺部との明るさの差）が含まれている。図中では画像の左上が赤色になっており、画像上部の河川フロントのあたりにおいても口径食の影響を受けていることが他の部分との色の違いから確認できる。口径食は、実際の海上には生じていない関係のない空間分布であり、流速場を正確に把握することが難しくする。本研究では高見(2022)が行なった DJI Image Processing Guide の手順に基づいて口径食の低減を行う。

2.2.2 色の変換

マルチスペクトル画像のうち青色波長と緑色波長を用いることで、海色の特長を明瞭に捉えやすくなる（高見, 2022）ことから、画像解析では単色画像ではなく B/G 値画像を用いて行う。変換は DJI Image Processing Guide に基づいて、口径食の低減後の青色波長値 $Blue_{ref}$ と緑色波長値 $Green_{ref}$ を用いて以下の式(10)により B/G 値を計算する。

$$\frac{B}{G} = \frac{Blue_{ref} - Green_{ref}}{Blue_{ref} + Green_{ref}} \quad (10)$$

2.2.3 太陽光の照り返しによるノイズの低減

晴れている際の空撮画像には太陽光の照り返しによるノイズが頻繁に見られる。これらのノイズは画像の明るさを変え、流速の推定を難しくする場合があります、除去が必要である。本研究では Flat Field 補正 (R. M. Zain et al., 2017) を用いる。この手法は画素の明るさを均一に近づけることで太陽光の反射の影響を低減させるものである。B/G 値に変換した画像 (BG_img) を 3×3 の平均化フィルタにより平滑化した画像 (dst) で割り、さらに画像全体の平均濃度値 ($AVEs$) を掛けることで補正しており、補正後の画像を FFC_img は式(11)によって表される。

$$FFC_img = \left(\frac{BG_img}{dst} \right) \times AVEs \quad (11)$$

2.2.4 射影変換

カメラを斜め 45 度に傾けて撮影することによって得られる画像は画像内で解像度が変化する。具体的には、画像の縦方向の解像度については画像の下部と上部で約 4 倍の差が生じている (図 2.7.3)。この解像度の非均一性は、画素の変化をもとに流速場を推定する際に特徴点の値および求まる流速に誤差が生じる。そこで本研究では解像度の歪みから生じる問題を低減するため、射影変換を行い、斜めに撮影された画像を直下に撮影されたような画像に変換する。画像内の解像度の歪みを補正することで、より正確な推定結果が得られる。

射影変換には、ドローンの撮影高度 h 、カメラの傾斜角 (今回は 45°)、カメラの画角 θ の 3 つの情報が必要である (図 2.7.4)。カメラの画角 θ は、式(3)・(4)から求まる。射影変換後の画像の解像度を上底に合わせると 0.167 m/pixel、下底の長さは左右 765 px ずつ狭まったような画像になるはずである。

一般的に 2 次元の四角形から四角形への射影変換は、元の画像の頂点を $(x_0, y_0)(x_1, y_1)(x_2, y_2)(x_3, y_3)$ とし、射影変換後の画像 (解像度が均一で真下に向けたような画像) の頂点を $(p_0, q_0)(p_1, q_1)(p_2, q_2)(p_3, q_3)$ とするとき (図 2.7.5)、これら 4 つの対応点情報を基に撮影時の斜めの座標系 (x, y) から直下の座標系 (p, q) への変換は、次の式(12)のように表すことができる (四角形から四角形への変換, 2024)。

$$\begin{pmatrix} p \\ q \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = G \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

G は座標系を変換する変換行列であり、未知数が 8 個存在するため、射影変換後の画像の頂点は画像の左上から $(p_0, q_0) = (x_0, y_0)$ 、左下 $(p_1, q_1) = (x_1 - 765, y_1)$ 、右下 $(p_2, q_2) = (x_2 + 765, y_2)$ 、右上 $(p_3, q_3) = (x_3, y_3)$ とした 8 組の対応点の情報を用いることで G を求めることができる。

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ q_0 \\ p_1 \\ q_1 \\ p_2 \\ q_2 \\ p_3 \\ q_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 & y_0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_0p_0 & -y_0p_0 \\ 0 & 0 & 0 & x_0 & y_0 & 1 & -x_0q_0 & -y_0q_0 \\ x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_1p_1 & -y_1p_1 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & -x_1q_1 & -y_1q_1 \\ x_2 & y_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_2p_2 & -y_2p_2 \\ 0 & 0 & 0 & x_2 & y_2 & 1 & -x_2q_2 & -y_2q_2 \\ x_3 & y_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_3p_3 & -y_3p_3 \\ 0 & 0 & 0 & x_3 & y_3 & 1 & -x_3q_3 & -y_3q_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \\ g \\ h \end{pmatrix} = J \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \\ g \\ h \end{pmatrix} \quad (13)$$

式(13)の両辺に J^T (J の転置) を左から乗じて J の正規化を行えば、 G の各成分が求まり、斜めに空撮した画像を補正できる。

2.2.5 平滑化

射影変換後の画像内に含まれるグリッドスケールのノイズが、流速場の推定結果に影響しないように、平滑化を行なった。グリッドスケールの誤差は、観測誤差および太陽光の照り返しによって海面上で生じることがあり、周辺の画素と相関を持たない孤立的に存在する画素変化である。本研究では、画像内の特徴を保ちつつノイズを除去するため、平滑化処理として濃度値に重み係数を加えた 3×3 のガウシアンフィルタ(図 2.7.6)を用いることで、画素レベルで生じるような細かなノイズを除去した。

2.3 河川フロントの流速場を求める手法

時間が連続した画像から流速場を求める手法として、画像相関法と空間的局所最適化法がある。画像相関法とは、同一地点で撮影した2枚の画像において各画素の濃度値の空間相関を求め、画像間での変化から速度場を導出する手法である。具体的には、図2.8.1に示すようにある時刻 t の画像内の $n \times n$ pixelを基準領域と設定したとき、 Δt 秒後の画像内の $n \times n$ pixelの中心が、定めた領域より大きい任意の領域において最も相関が高い地点へと移動したと考える手法である。空間解像度が r cm/pixelで、移動距離を m pixelとすると、画像間での移動速度は m [pixel] \times r [cm/pixel] \div Δt [s] から求まる。この手順を、画像内のあらゆる点に対して計算することで、画像全体の流速場を求めることが可能であり、阿部(2020)もこの手法にて河川フロントの流速場を求めることに成功している。この手法の長所は、明るさの急激な変化や画像内のノイズの影響を受けにくいことである。欠点は、計算範囲が広いと計算の時間コストが膨大になるほか、対象領域の拡大や縮小、回転に対応できないことである。

空間的局所最適化法(Lukas and Kanade., 1981)とは、画像間で特徴となる点を定め、特徴点周辺において濃度値の空間勾配と時間勾配から画像間で起こる特徴点の移動距離を推定する手法である。この手法の利点は、対象領域の拡大や回転などの変形に対応できることである。欠点は、推定の際に画像間の急激な明るさの変化や画像内に含まれるノイズの影響を受けやすいことである。本研究では河川フロント上で起こる細かな渦の動きを明らかにしたいため、画像間で起こる形状の回転や変形に対応が可能な空間的局所最適化法を採用することにした。

2.3.1 特徴点の抽出

空間的局所最適化法は画像内の特徴となる点を定める必要があり、本研究では Harris のコーナー法を用いて特徴点を抽出した (Harris & Stephens., 1988)。特徴点を 3×3 画素領域内で空間勾配 (濃度値の変化量) が大きい点と定義する方法であるため、今回撮影した河川フロントのように明るさが大きく変化する場所には有効的な手法である。画像内の任意の点 (x, y) における濃度値を I 、濃度値の縦・横方向の空間勾配をそれぞれ I_x 、 I_y とすると特徴量 R は

$$R = \det(M) - k \cdot (\text{trace}(M))^2 \quad (14)$$

と表せる。ここで $\det(M) = I_x^2 I_y^2 - (I_x I_y)^2$ 、 $\text{trace}(M) = I_x^2 + I_y^2$ 、

$$M = \sum w_{(x,y)} \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

である。 $w_{(x,y)}$ は (x,y) 近傍の画素を用いるための重み付きの係数であり、 k は経験則により決定される定数である。 R の値が大きいくほど画像内に強い特徴をもつ点であり、本研究においては $R=371000$ 以上を特徴点として抽出する。

2.3.2 空間的局所最適化法

空間的局所最適化法では、特徴点周辺の濃度値の空間勾配と時間勾配から画像間で起こる特徴点の移動距離を推定する際、画像間での微小な変化に対しても適応できる。図 2.8.2 のように、ある時刻 t において (x,y) にある特徴点が Δt 秒後経過した後の位置を $(x + \Delta x, y + \Delta y)$ とすると、任意の特徴点の移動は、以下のように表せる。

$$I_{(x,y,t)} = I_{(x+\Delta x, y+\Delta y, t+\Delta t)} \quad (16)$$

式(16)の右辺をテーラー展開して右辺を近似すると

$$I_{(x+\Delta x, y+\Delta y, t+\Delta t)} \cong I_{(x,y,t)} + I_x \Delta x + I_y \Delta y + I_t \Delta t \quad (17)$$

となる。ここで I_t は濃度値の時間的な勾配であり、点 (x,y) における2枚の画像の濃度値 $(\frac{\Delta I}{\Delta t})$ である。式(17)を式(16)に代入すると

$$I_x u + I_y v = -I_t \quad (18)$$

と表すことができ、ここで $u = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ 、 $v = \frac{\Delta y}{\Delta t}$ は流速である。式(18)では未知数が2つ(u, v)存在するため、このままでは一意な解を求めることはできない。そこで特徴点周辺の局所領域内において速度ベクトルは一定であるとさらに仮定すると k 番目の画素について

$$I_{xk} u + I_{yk} v = -I_{tk} \quad (19)$$

という関係が成り立ち、 $n \times n$ 画素の局所領域内を考慮すると

$$AV = -B \quad (20)$$

と表現できる。ここで、 A 、 V 、 B は

$$A = \begin{bmatrix} I_{x1} & I_{y1} \\ I_{x1} & I_{y2} \\ \vdots & \vdots \\ I_{xn^2} & I_{yn^2} \end{bmatrix}, \quad V = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} I_{t1} \\ I_{t2} \\ \vdots \\ I_{tn^2} \end{bmatrix} \quad (21)$$

と表すことができ、式(20)を V について解くと

$$V = -(A^T A)^{-1} A^T B \quad (22)$$

となり、速度ベクトル (u, v) が求めることができる。なお空間的局所最適化法の実装は画像処理のライブラリである OpenCV の `cv2.calcOpticalFlowPyrLK` 関数を用いる。

2.4 渦を捉えるために使用する可視画像と前処理

本研究では、空間的局所最適化法の検証のため、より明確に渦が観測できた過去の同じ観測地点にて撮影された空撮画像も用いる (図 2.9.1)。この空撮画像は空撮ドローンを用いて、高度 150m にてカメラを真下に向けて 3 秒間隔で河川フロントを撮影したものである (阿部, 2020)。4 章で示す解析結果と考察は、この空撮画像を基に行う。ただし、空撮はマルチスペクトルカメラではなく、可視カメラにて実施したため、画像の前処理とは異なり、可視画像の色空間である RGB 色空間から CIE Luv 色空間に変換している (図 2.9.2)。

CIE Luv 色空間に変換する理由は、RGB 色空間が人の感じる色差をもとに作られたものであるため、色の変化に対して非線形であり、定量的な評価と解析が難しいためである。一方、CIE Luv 色空間は色の変化が線形的であり、色の変化量を定量的に表すことができる。また CIE Luv 色空間は明るさ (L) の軸、緑から赤までの移行 (u) 、黄色から青色への移行 (v) の情報が得られる 3 次元の座標 (L, u, v) を持つ均等色空間で構成されており、河川フロントの位置を特定するのに有効な明るさを定量化することができる。本研究においては、OpenCV ライブラリの `cv2.cvtColor` 関数を用いて RGB 色空間から CIE Luv 色空間に変換した。変換後のそれぞれの軸は $0 \leq L \leq 100, -134 \leq u \leq 220, -122 \leq v \leq 140$ の範囲となっている。本研究では、河川フロントの位置は、明るさ情報 (L) のみを用いて解析した。

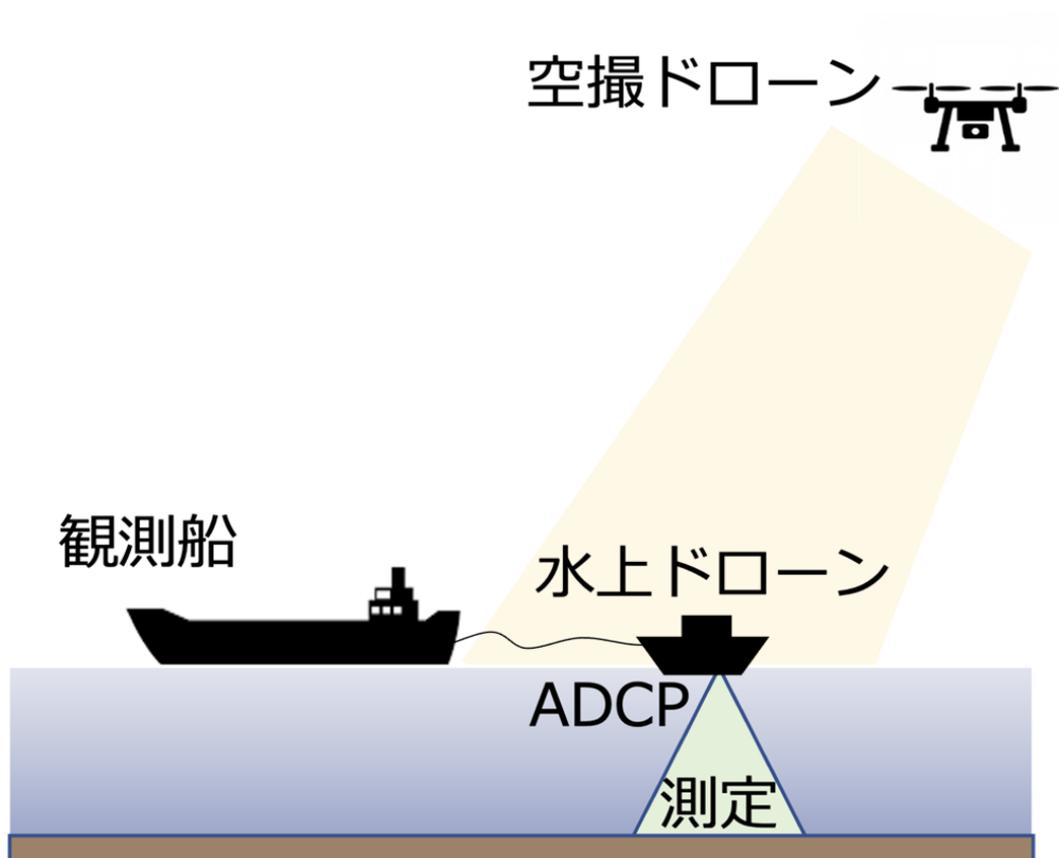


図 2.1 厚岸湾での観測手法のイメージ図。空撮ドローンのカメラを斜め 45 度に傾けて撮影し、撮影範囲における流速を水上ドローンに搭載した ADCP で測定する



図 2.2 本研究で使用した空撮ドローン (DJI 社製 P4 Multispectral)

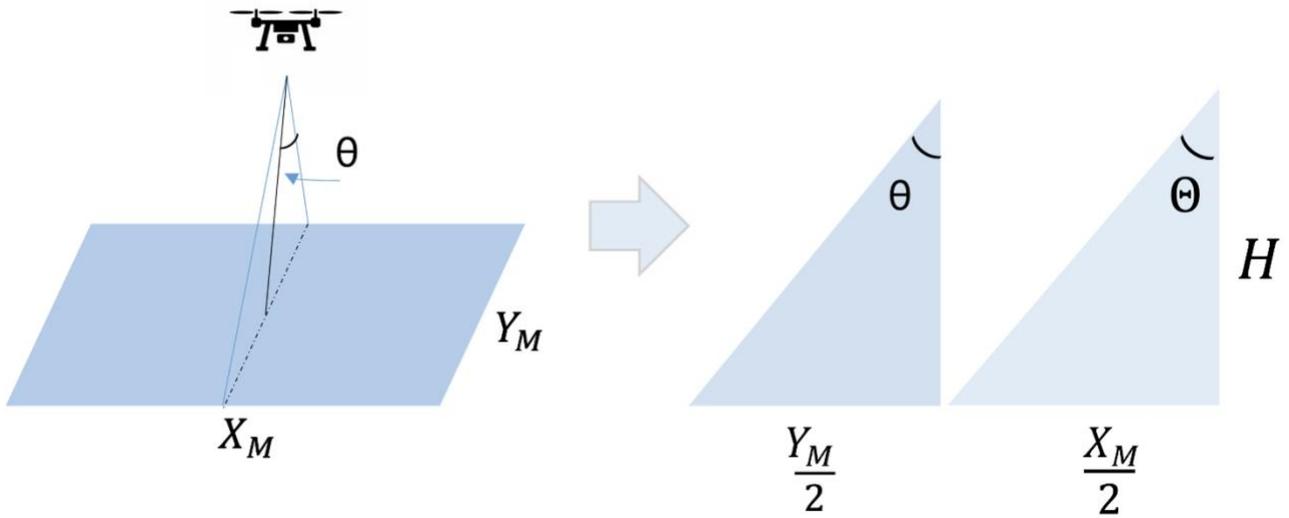


図 2.3 斜め 45 度に傾けた撮影範囲を求めるための模式図。縦・横方向の画角の半分を θ 、 Θ とする

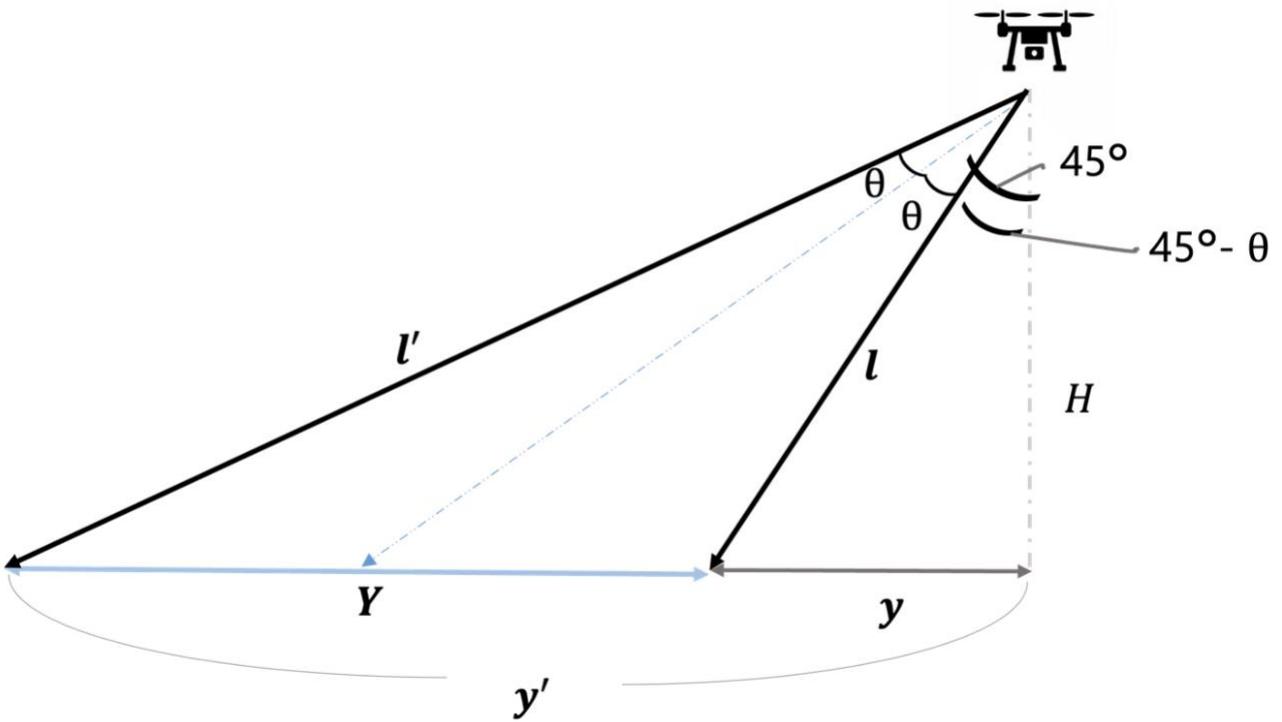


図 2.4 縦・横の画角と撮影高度から斜め 45 度の撮影範囲を求めるための模式図



図 2.5 水上ドローン (ウルトラハイスピードボート)



図 2.6 River Pro ADCP

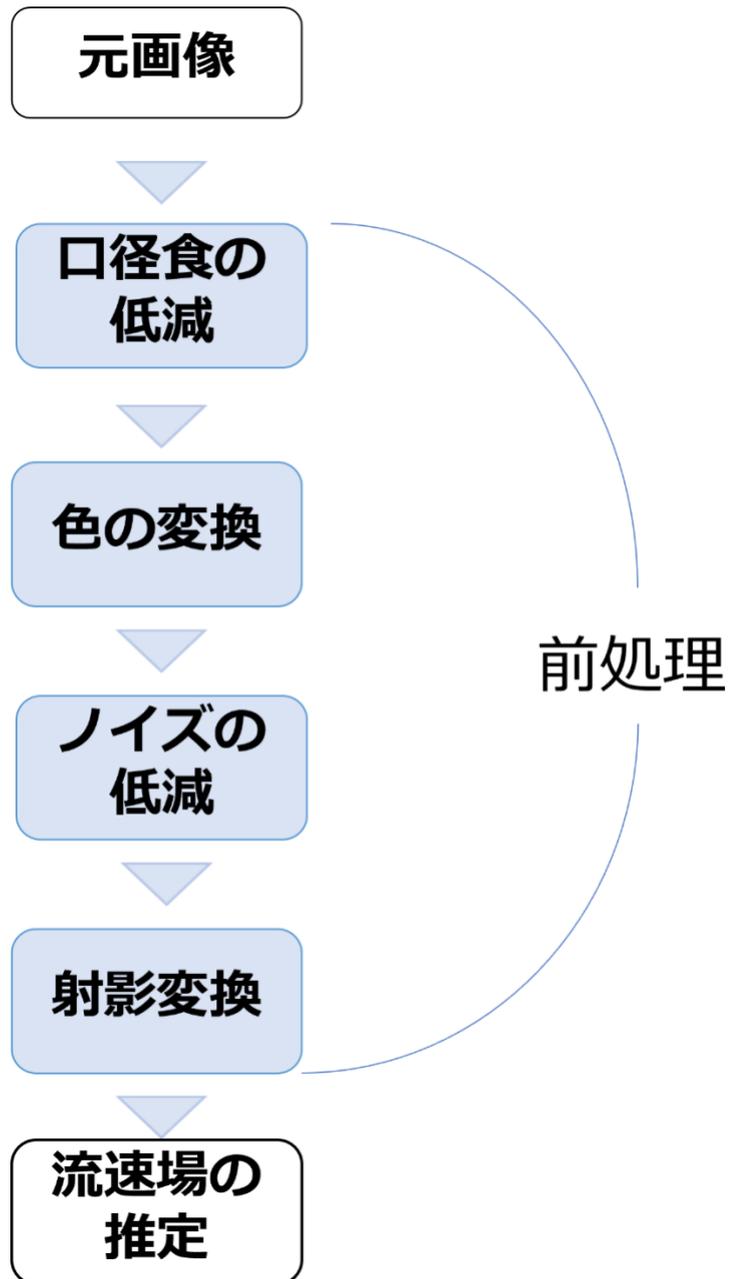


図 2.7.1 斜めの空撮画像を用いて流速場の推定を行うための前処理の流れ

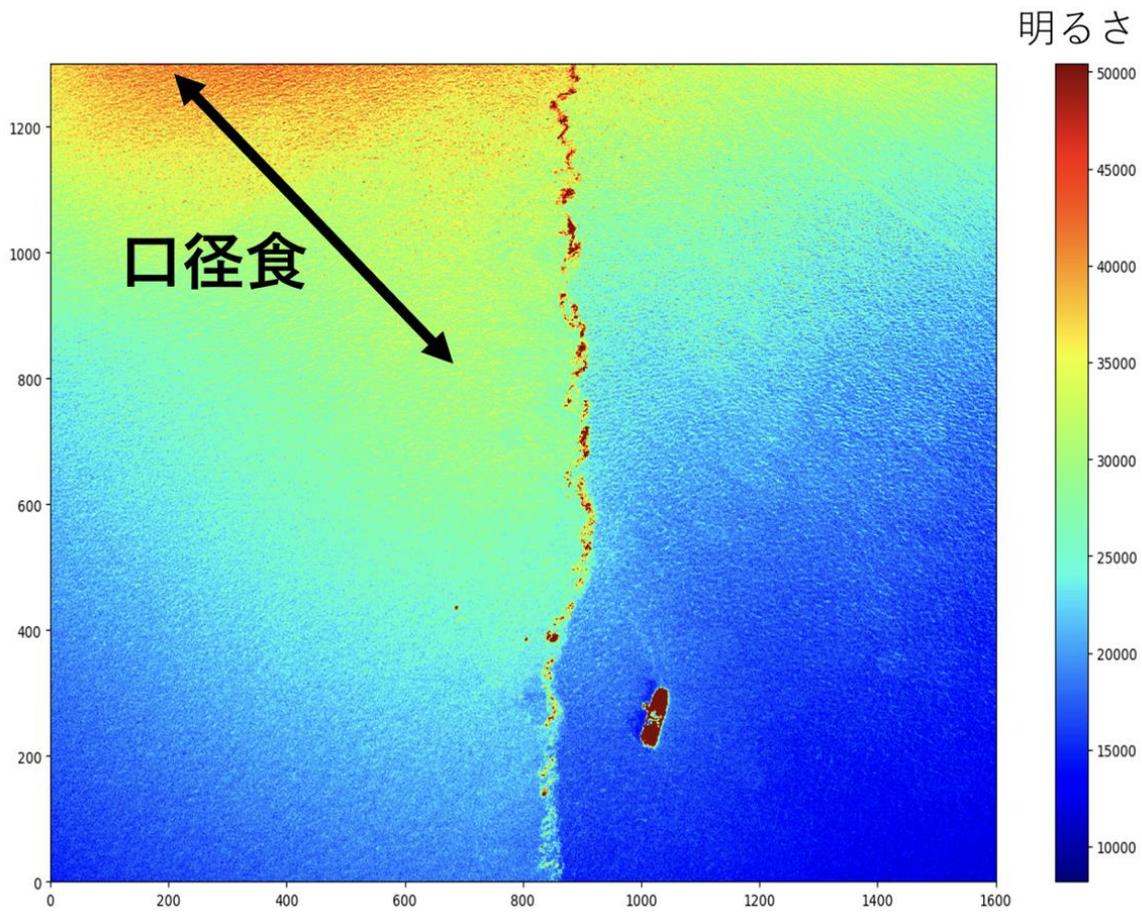


図 2.7.2 マルチスペクトル画像（緑色波長）内に含まれる口径食。左上から中央にかけて見られ、河川フロントへ影響しているほか、周囲よりも高い明るさとなっている。

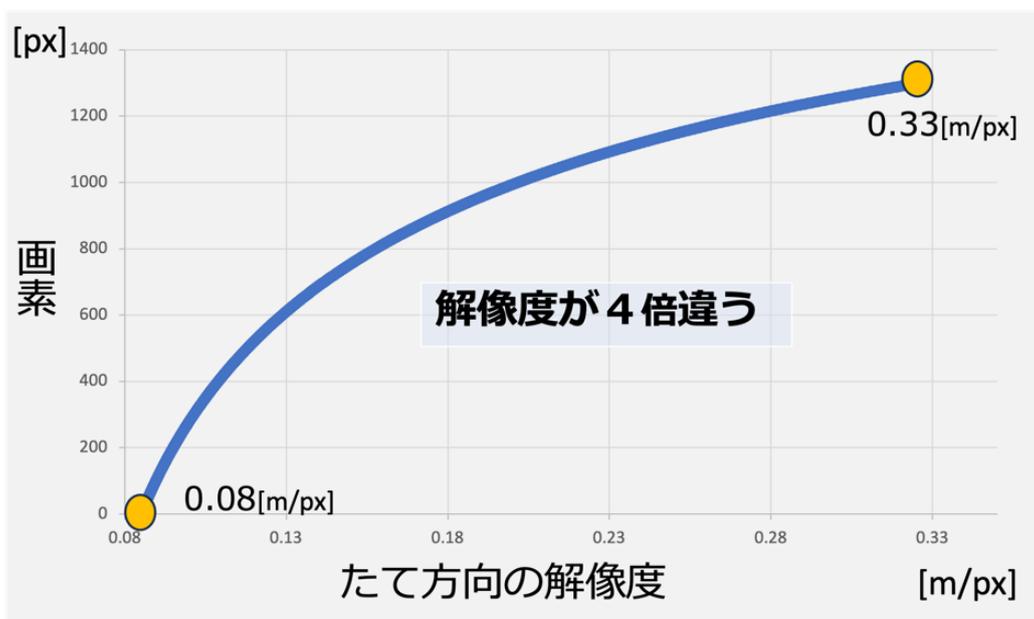


図 2.7.3 斜めの画像における縦方向の解像度を示す。

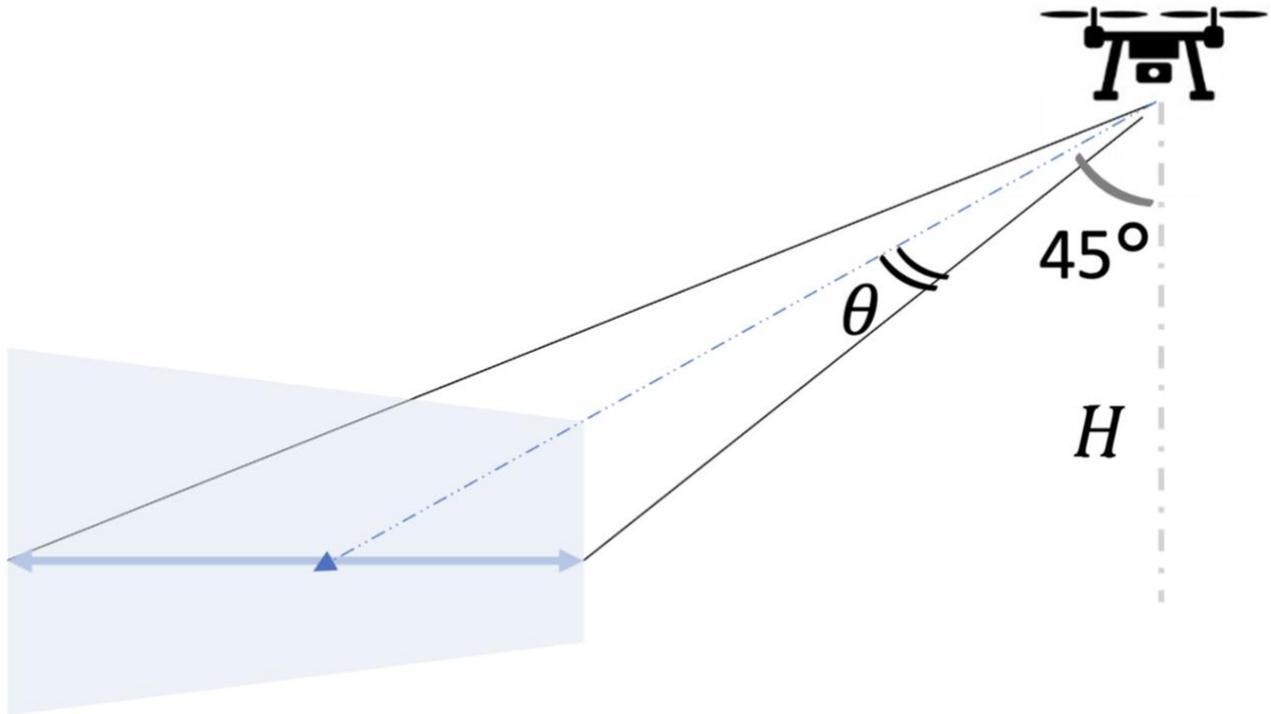


図 2.7.4 射影変換するために必要なパラメータの模式図

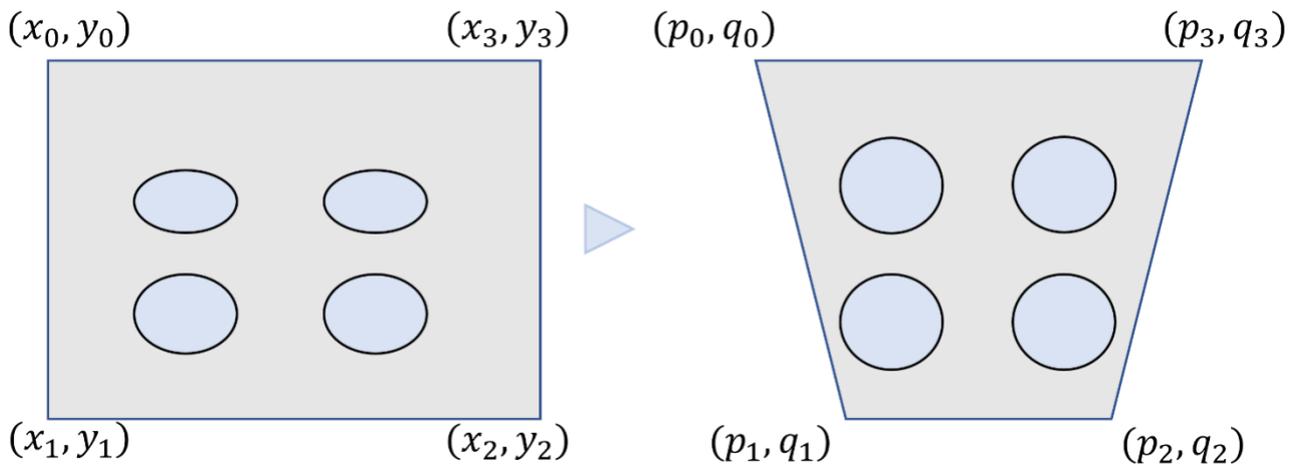


図 2.7.5 斜めの座標系 (x, y) と真下を向けた時の座標系 (p, q) との対応点

1/16	2/16	1/16
2/16	4/16	2/16
1/16	2/16	1/16

図 2.7.6 平滑化に用いたガウシアンフィルタ

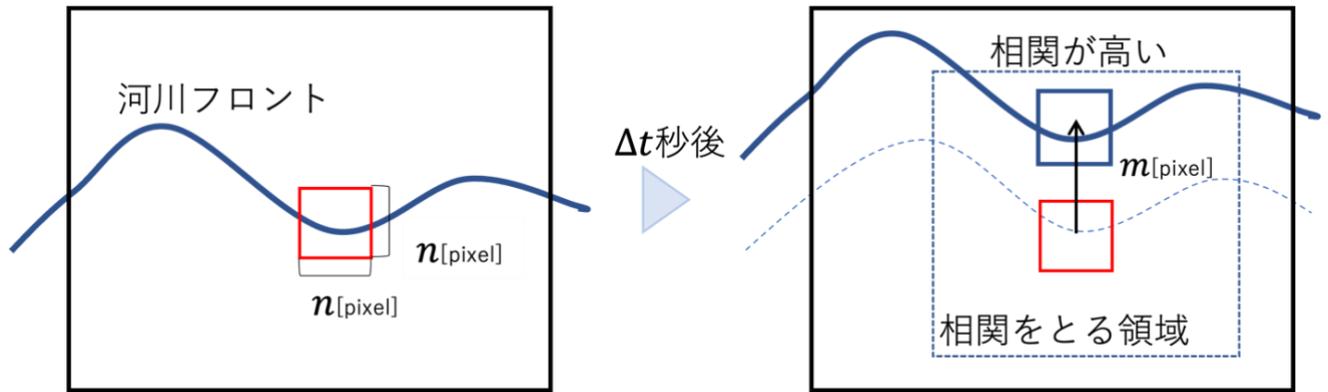


図 2.8.1 画像相関法の模式図

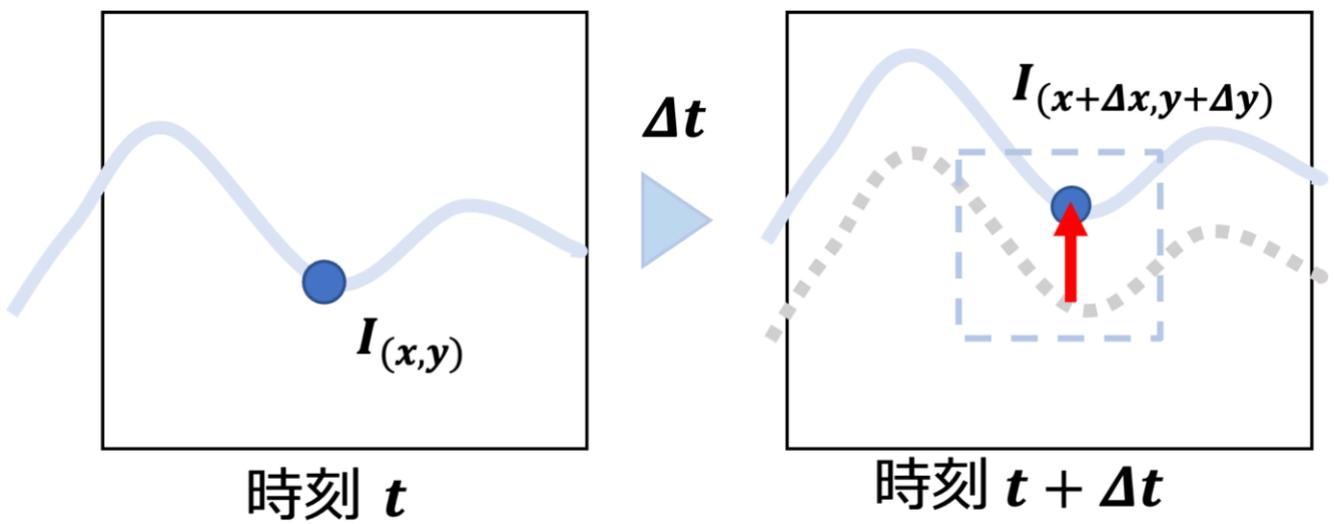


図 2.8.2 空間的局所最適化法の模式図

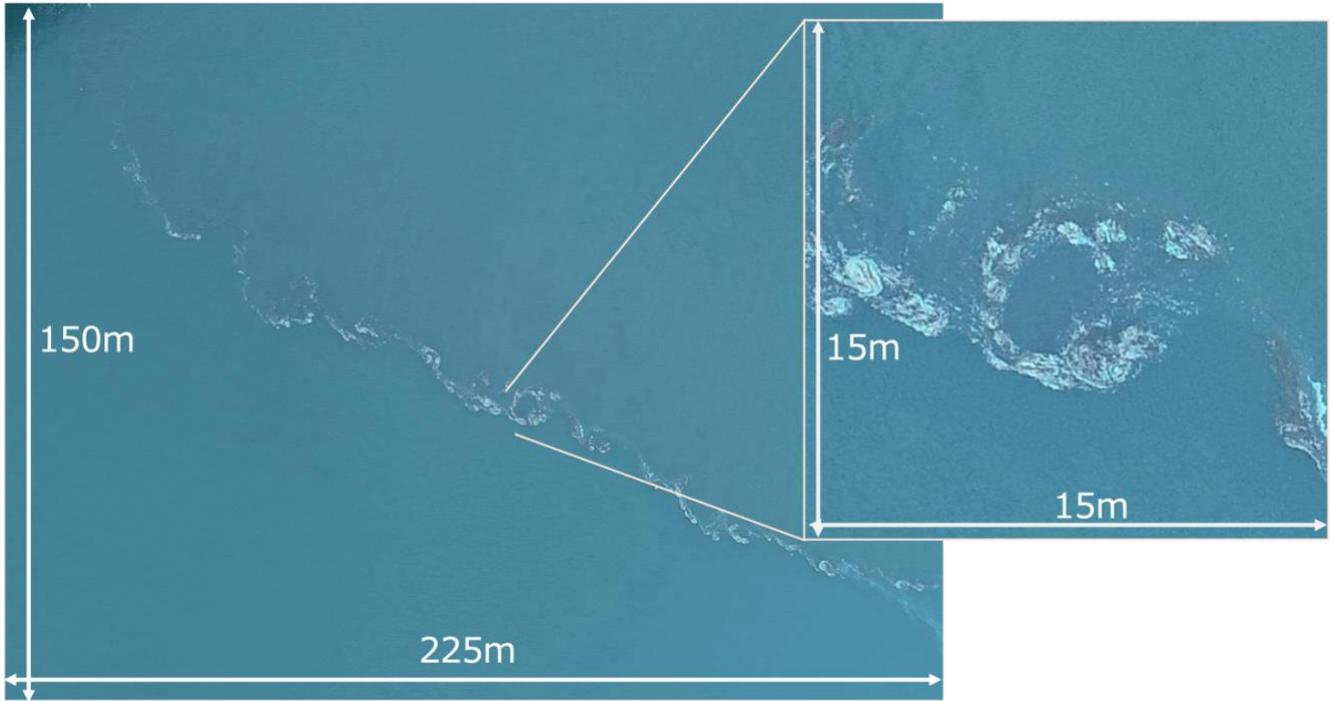


図 2.9.1 過去にカメラを真下に向けて空撮された画像（2019年10月2日9時57分41秒に取得）
河川フロントを捉えていることが確認でき（左）、拡大するとフロント上に渦が形成している（右）

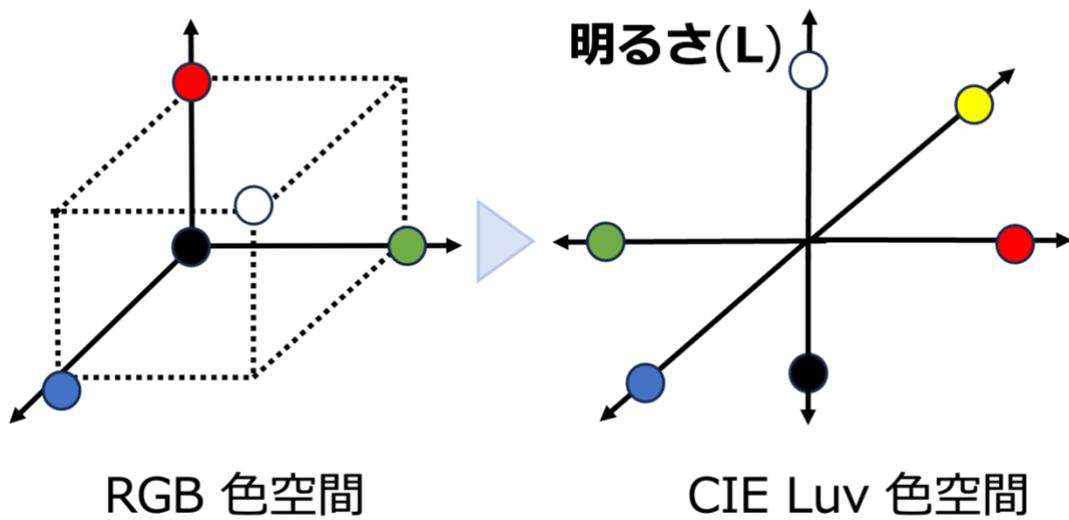


図 2.9.2 可視画像の色空間の変換

RGB 色空間から CIE Luv 色空間に変換をすることで色の変化量を定量的に表すことができる

第3章 観測結果と河川フロントの流速場の推定結果

3.1 観測結果と空撮画像の前処理の結果

厚岸湾では、2022年9月27日に午前と午後の2回に渡り、9時28分から16時30分まで観測を行い、天候は晴れ、風は穏やかであった。空撮から得られた可視画像(14時44分03秒に撮影)からは、河川フロントを境に河川水と海水の間で変化する海色、そしてフロント上に集積する細かな泡が確認でき、河川フロントの形状を観測することに成功した(図3.1)。また、カメラを斜め45度に傾けて空撮した画像にも水平線が入ることはなく、当初の計画通り、上底266m、下底136m、縦202mと広範囲な領域を空撮できた。もしカメラを直下に向けていたら、河川フロントの全体を一枚の画像で取得することは難しかったであろう。

空撮画像の前処理は図2.7.1に示す通り、まず口径食の低減を行った(図3.2)。図2.7.2に示すように赤色に見えていた画像の左上の領域が、図3.2に示すように緑色に変化したことがわかる。口径食の低減により画像の端の部分で発生していた光の拡散が抑えられ、河川フロントへの影響が減少したためである。

次に青色波長と緑色波長の画像を用いてB/G値へ変換を行った(図3.3)。フロントに沿った色の変化をより明確に捉えることができたが、画像中の濃度値には、ばらつきが残っている。これは海面上の太陽光の照り返しによるノイズが生じていたことが原因の一つと考えられたため、Flat Field補正によるノイズの低減を行い、図の右下のグラフから濃度値が75付近に集中していることから照り返しの影響が低減することができた(図3.4)。

さらに、射影変換を行い、空間解像度が均一で真下をみたような画像への変換を行なった(図3.5)。河川フロントの見え方が上底付近で顕著に変化し、射影変換前の画像では河川フロントが3次元的に映っていた構造が、2次元的になったことが確認できた。また下側に映り込んでいる観測船も、射影変換前の画像では斜めに角度がついて見えていたが、変換によって解消されている。

ここからの解析は利便性のため、河川フロントを含み、かつ欠損値が含まれないような領域を解析領域として解析を進める。図3.5に示されている白色の点線で示した枠内がこの解析領域である。

3.2 河川フロントの流速場の推定結果

Harrisのコーナー法を用いて特徴点を抽出し(図3.6)、空間的局所最適化法を用いて河川フロントの流速場を求めた。抽出された特徴点は、当初の目的通り河川フロント上や観測船周辺に集中していることが確認できる。そして河川フロント以外の場所ではほぼ特徴点は見られない。特徴点の抽出にあたってフロント付近の流れ場を抽出するために、3.1節で行った前処理が有効に機能していることがわかる。

空間的局所最適化法は、画素領域を特徴点周辺の 30×30 画素を対象として推定を行った。今回は推定領域を 30×30 画素としたが、 30×30 画素より狭めた場合では処理時間はその分短くなるものの、流速の推定が推定範囲外へと飛び出すような過度に大きな値をとる場合や方向がランダムになってしまった。また、 30×30 画素より大きくした場合では、推定結果は 30×30 画素領域とさほど変わらない上、処理時間が長くなった。以上の結果から今回の推定領域は 30×30 画素を用いることにした。

計算より河川フロント周辺の流速を推定することができた(図3.7)。流速は、図の上部では上向き、

中央から下部にかけては右上方向であることがわかる。空撮画像は厚岸湖が上底方向に、厚岸湾が下底方向、左辺が北、右辺が南になるように河川フロントを捉えているため、推定した流れ場は厚岸湾から厚岸湖への流れ、かつ南方向への流れを示している。流速の強さは平均 38 cm/s であった。

空撮ドローンの空撮を開始した約 40 秒後(14 時 43 分 43 秒)に、水上ドローンに取り付けた ADCP を用いた水中の流速測定も実施した(図 3.8)。ADCP から、厚岸湾側ほど海面付近で流速が速いことを示している。また海峡部に近づくとつれ、水深が深い部分で速い。これは河川プルームの下にある海水が存在する層で流速が速くなっていることを示唆している。

画像から空間的局所最適化法を用いて求めた河川フロントの流速場と、ADCP で計測した流速場(図 3.8)のうち海面に最も近い水深 22cm における流速(図 3.9)を比較する。ADCP の絶対流速は 45 分 36 秒頃(灰色の部分)では 70 cm/s を超える大きな値となっているものの、ドローンの撮影範囲では平均流速が 40 cm/s 前後の値となっていた。空撮画像から推定した流速である 38 cm/s も、水深 22 cm における ADCP の測定(40 cm/s)と非常に近い値である。また流れの方向は厚岸湾から厚岸湖に向かった流れである。また厚岸湖側ほど厚岸湖に向かう方向の流れが強く、このような流れの傾向は空撮画像から推定された流れ場の方向(図 3.7)と概ね一致する。また、フロント上にて ADCP で測定しているときのドローンのカメラを真下に向けた空撮画像(図 3.10)から、フロントは画面内に 2 つ生じており、上部にて 2 つのフロントが合流している可能性があるが、直下の画像では撮影範囲が狭いためフロントの全体像は掴めなかった。こうした ADCP で計測された流速場は斜めで空撮した時間から約 4 分後の測定結果であるため、多少の流速変化が起きた可能性は考えられるが、空撮画像から推定した流速場は、妥当な値であったことを示唆している。

3.3 ドローンの定点保持の精度と推定結果への影響

ドローンの定点保持の精度が流速推定の結果に与える影響の検証を、2023 年 7 月 14 日に福岡県宗像市の海岸で行なった(図 3.11)。検証結果を厚岸湾での推定値と比較するために、当時と同じ条件下である上空 140 m にてカメラを真下に向けて 5 秒間隔で空撮ドローンによる連続撮影を行った。観測では、時間経過に伴う移動をしない海岸沖に設けられる構造物である離岸堤を連続撮影することで、ドローンの移動にともなう流速推定誤差、つまり定点保持の誤差を把握することができる。

取得した画像(図 3.12)は、厚岸で取得した画像と同様の前処理を行い、空間的局所最適化法を用いて流速場を推定した。その結果、図 3.13 に示すような流速場が得られた。推定された流速場は構造物上でのみであり、平均移動速度は 3.5 cm/s であった。この速度は、厚岸で求めた河川フロントの平均流速 38 cm/s の 10 分の 1 程度に相当する。高度 140 m における直下での空撮では空間解像度が 7.4 cm/pixel であるため、3.5 cm/s の移動は 5 秒で 0.5 pixel 程度の画素以下の微小な移動に相当する。この結果から、空撮画像から得られた河川フロント付近の流速場の平均場を抽出することに関しては、定点保持による誤差の影響は小さく、信頼性の高い結果が得ることができていることが確認できた。

3.4 まとめ

ドローンで空撮した画像に空間的局所最適化法を用いることで、数秒および数 m スケールで形状が変化する河川フロントの流れ場を詳細かつ広範囲にわたって観測することに成功した。カメラを斜め 45

度に傾けて撮影することで、これまでの真下に向けた場合よりも約 3.7 倍と広範囲に河川フロントを捉えることができた。空撮画像は、口径食の低減、色の変換、射影変換、と前処理をすることで、河川フロントの形状の変化を適切に抽出できるようになり、流速場を求めることができた。空間的局所最適化法を用いて河川フロントの流速場を推定した結果は、厚岸湖に近い領域ほど厚岸湖向き、厚岸湾に近い領域ほど厚岸湖向きであるものの、南向き成分が強まることがわかった。この流れのパターンは、ADCP による測定結果と一致していることから、空撮画像を用いた推定結果は十分に妥当な結果であることが確認できた。

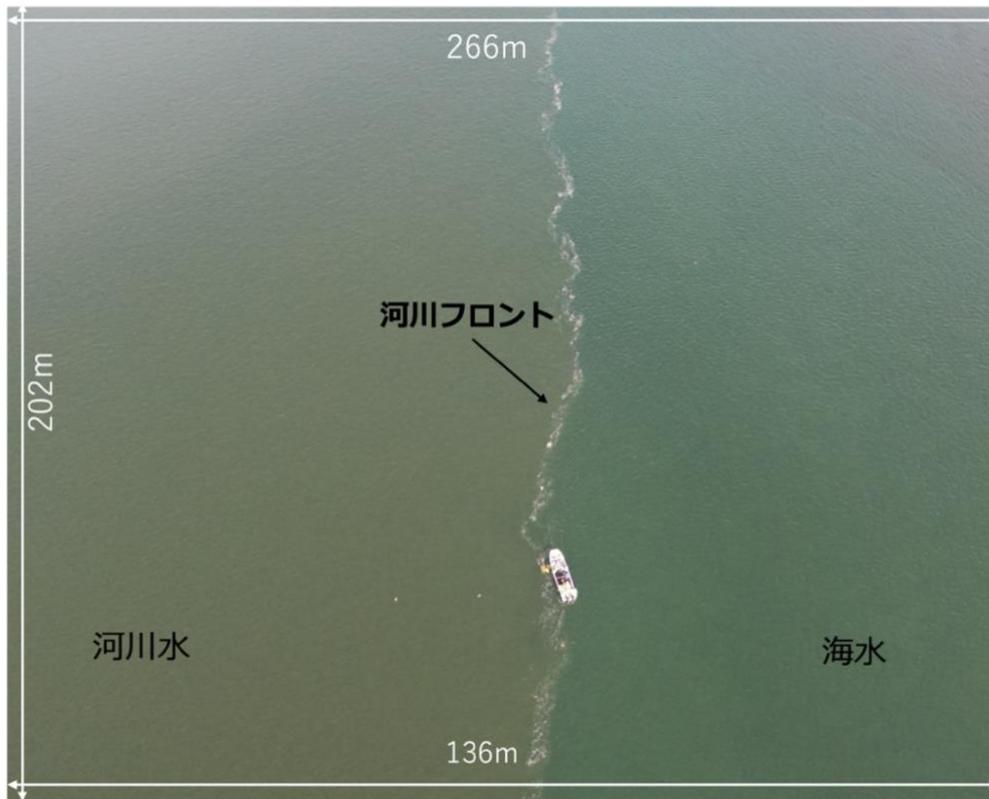


図 3.1 カメラを斜め 45 度傾けて空撮した画像。

河川フロントを境に河川水と海水の間で変化する海色やフロント上に集積する細かな泡が確認できる。

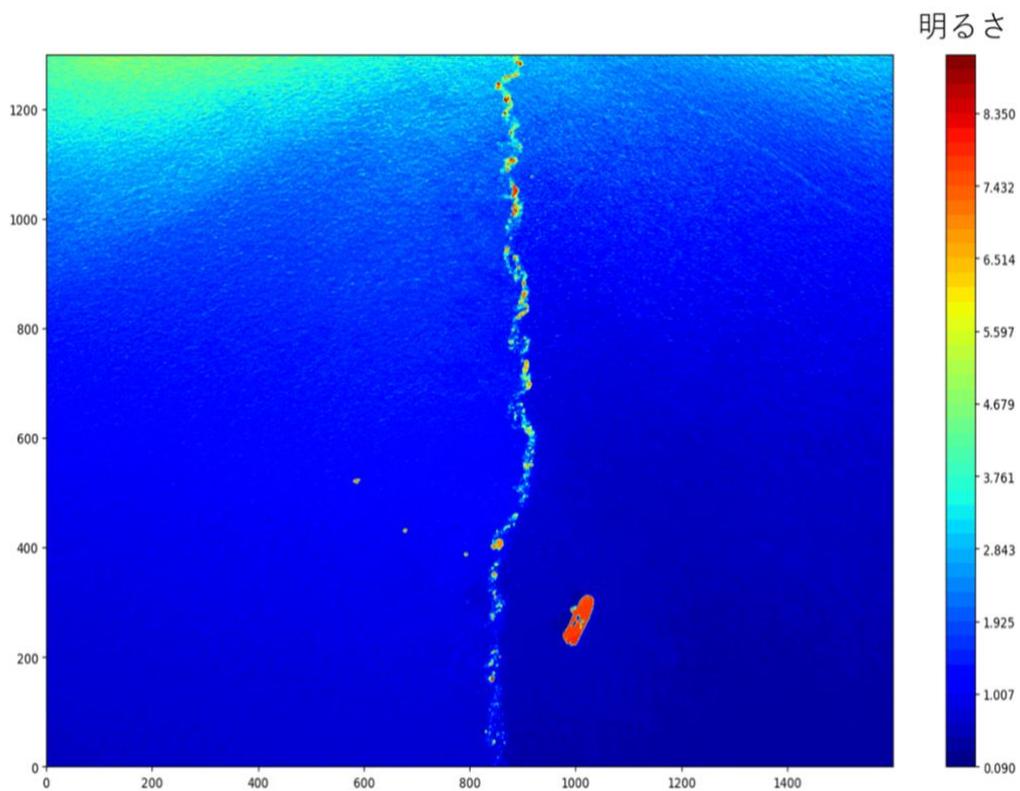


図 3.2 マルチスペクトル画像（緑色波長）にて口径食を低減した。図 2.7.2 において赤色に見えていた左上の領域が緑色に変化している。

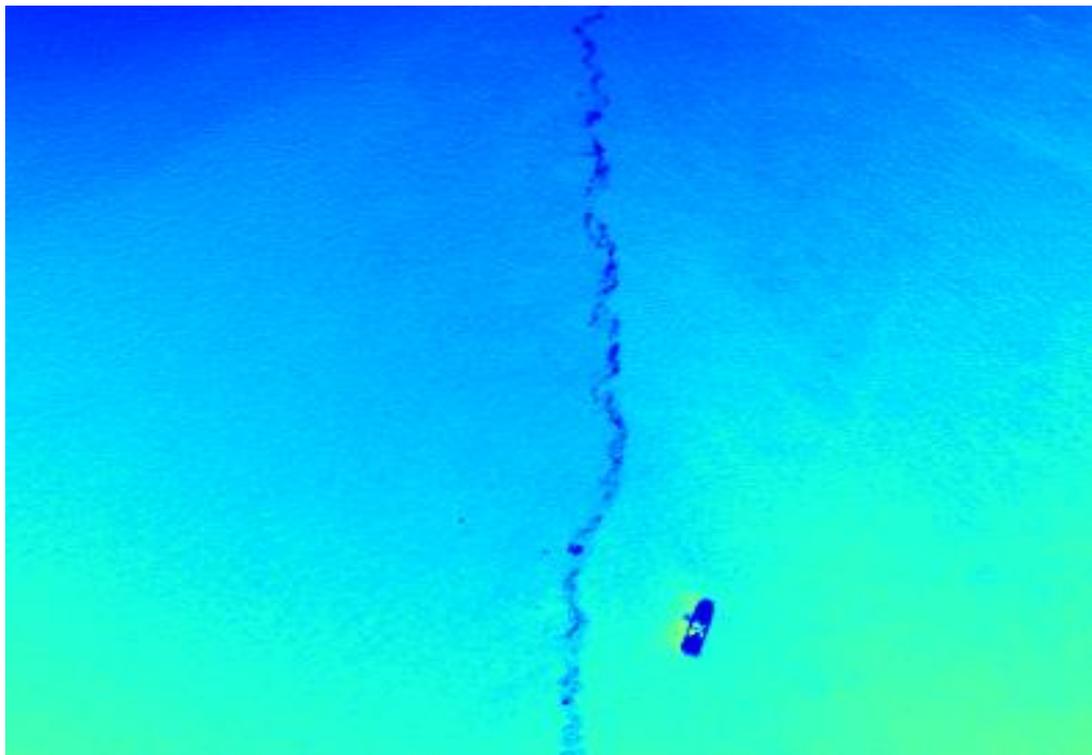


図 3.3 B/G 値に変換した画像

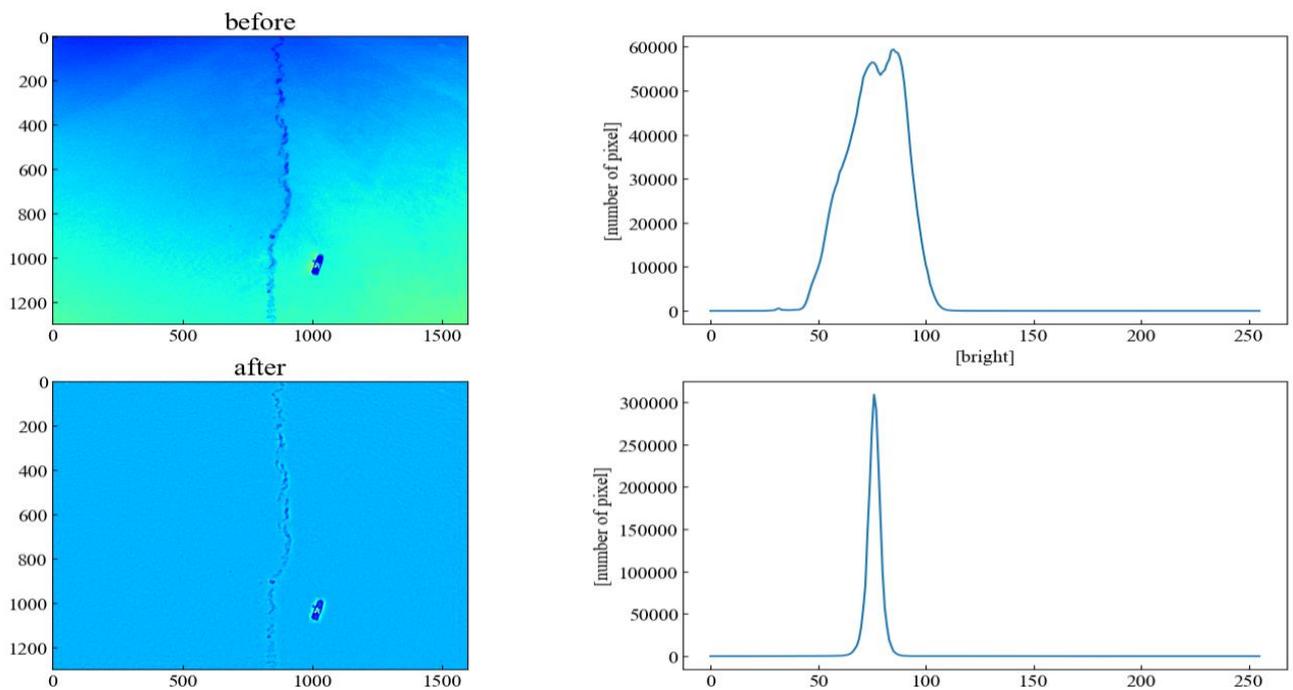


図 3.4 太陽光の照り返しのノイズを除去する前後
(上 : B/G 値に変換した画像、下 : Flat Field 補正後)

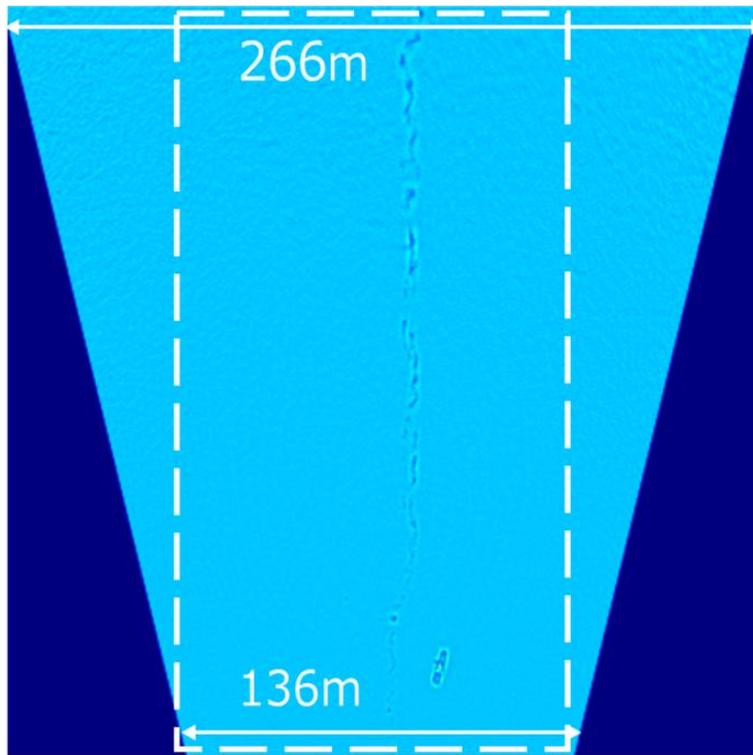


図 3.5 射影変換後の画像。端ではフロントは見られないため、白色の点線部分で画像を切り取る。

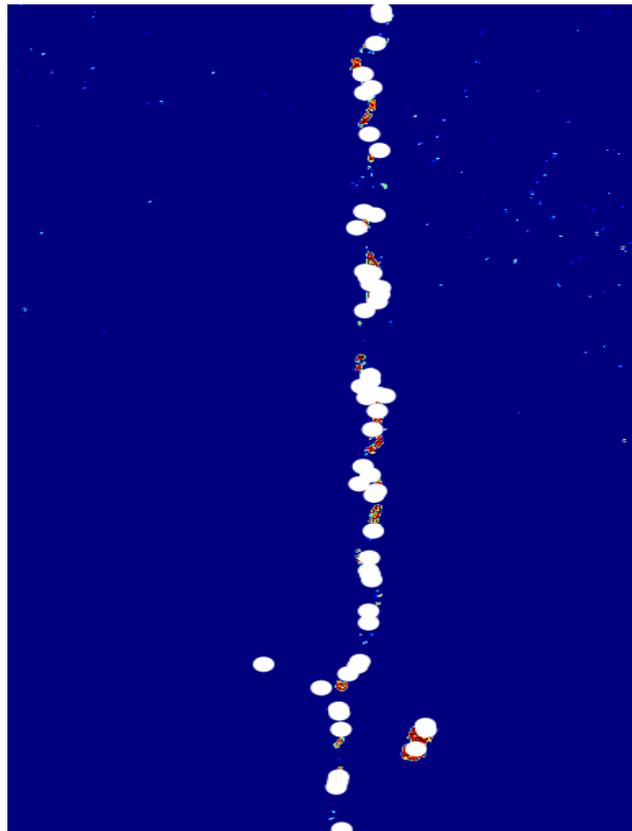


図 3.6 特徴点を抽出した結果。白色の丸が抽出した特徴点であり、河川フロント上や観測船周辺に特徴点が集まっている。また河川フロント以外の場所では、ほぼ特徴点は見られない。



流速40 cm/sの大きさ : →

図 3.7 河川フロントの流速場の推定結果。
流速は図の上部では上向き、中央から下部にかけては右上方向であることがわかる。

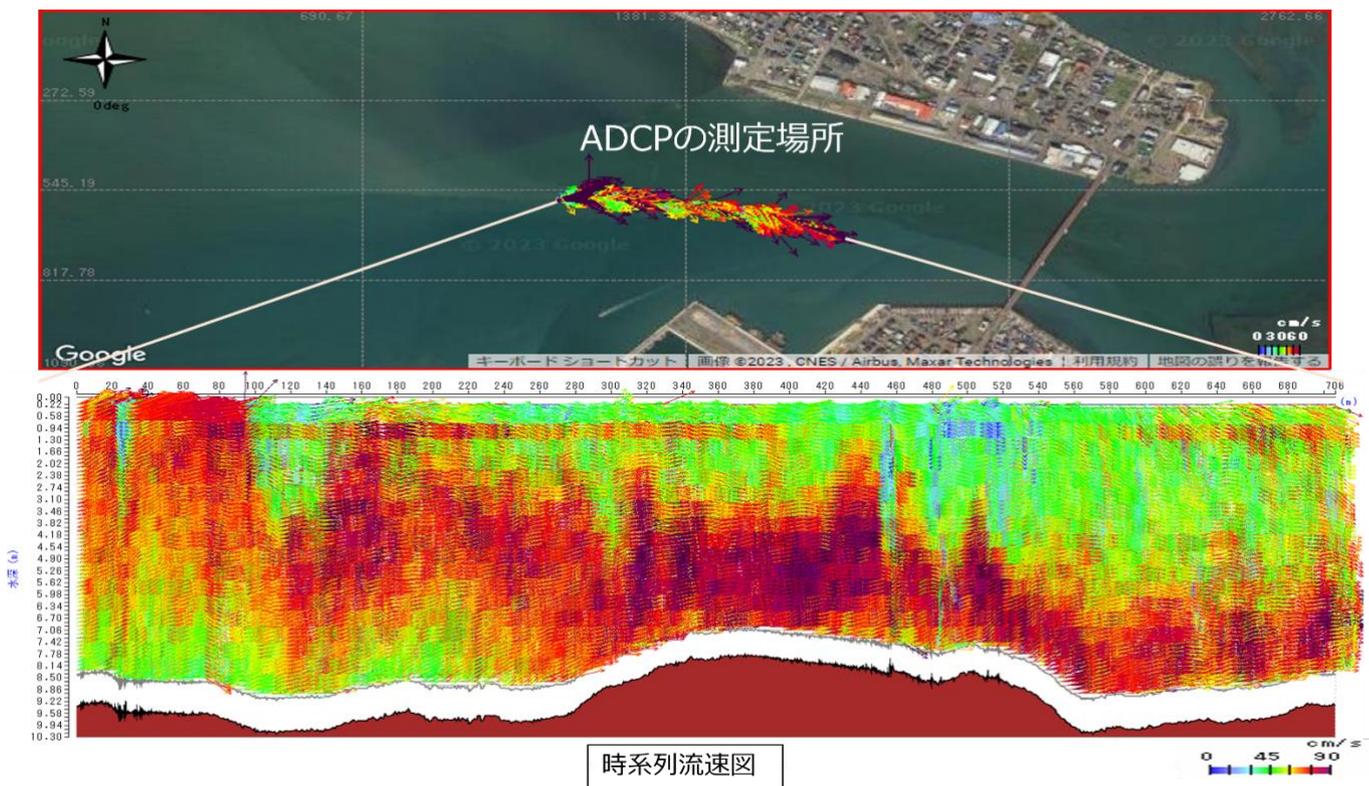
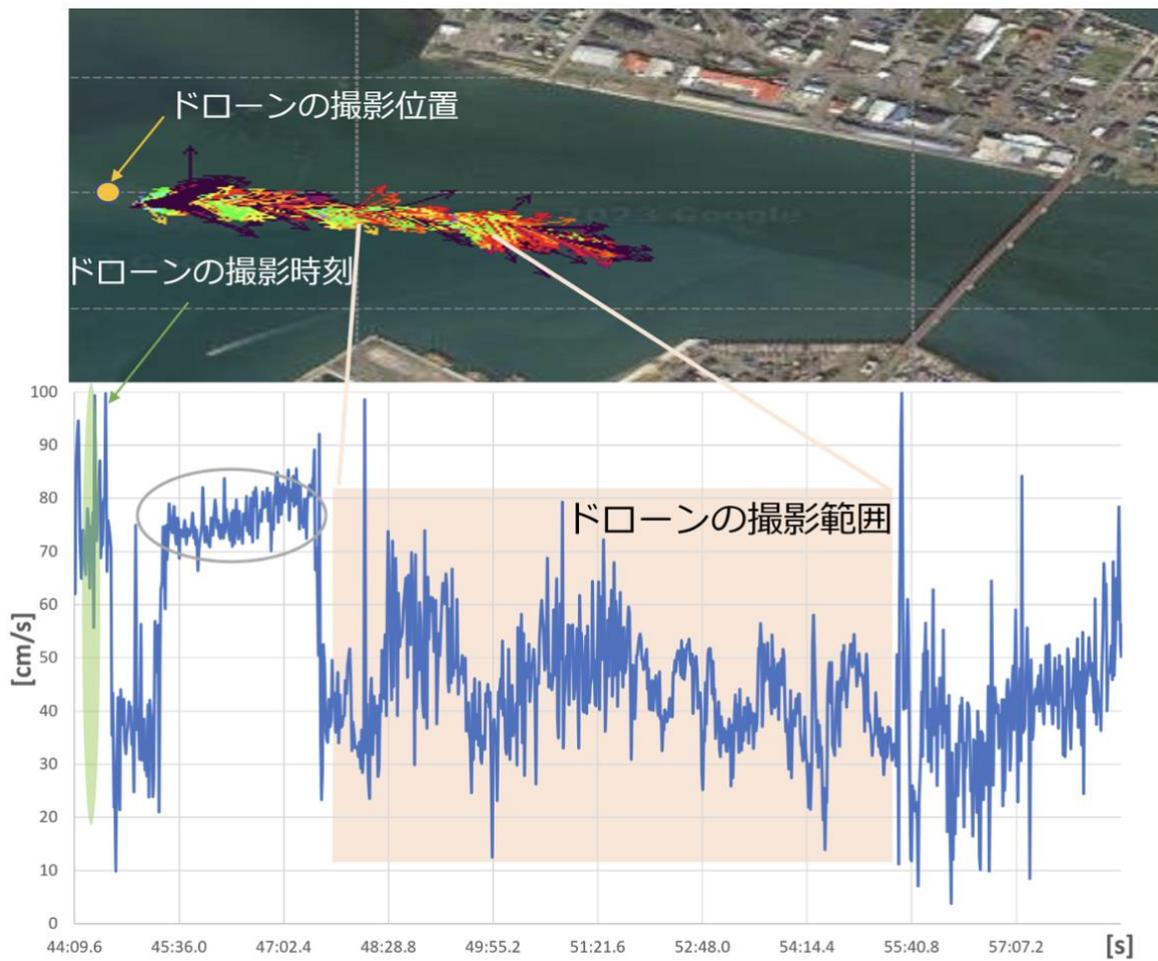


図 3.8 ADCP による測定場所と測定結果。
水深が深くなるにつれて流速が速くなっていることがわかる。



ADCPで測定した絶対流速(水深:約22cm)

図 3.9 水深 22cm における ADCP の測定結果。

流れは厚岸湾から厚岸湖の向きであり、流速はドローンの撮影範囲において平均 40 cm/s である。

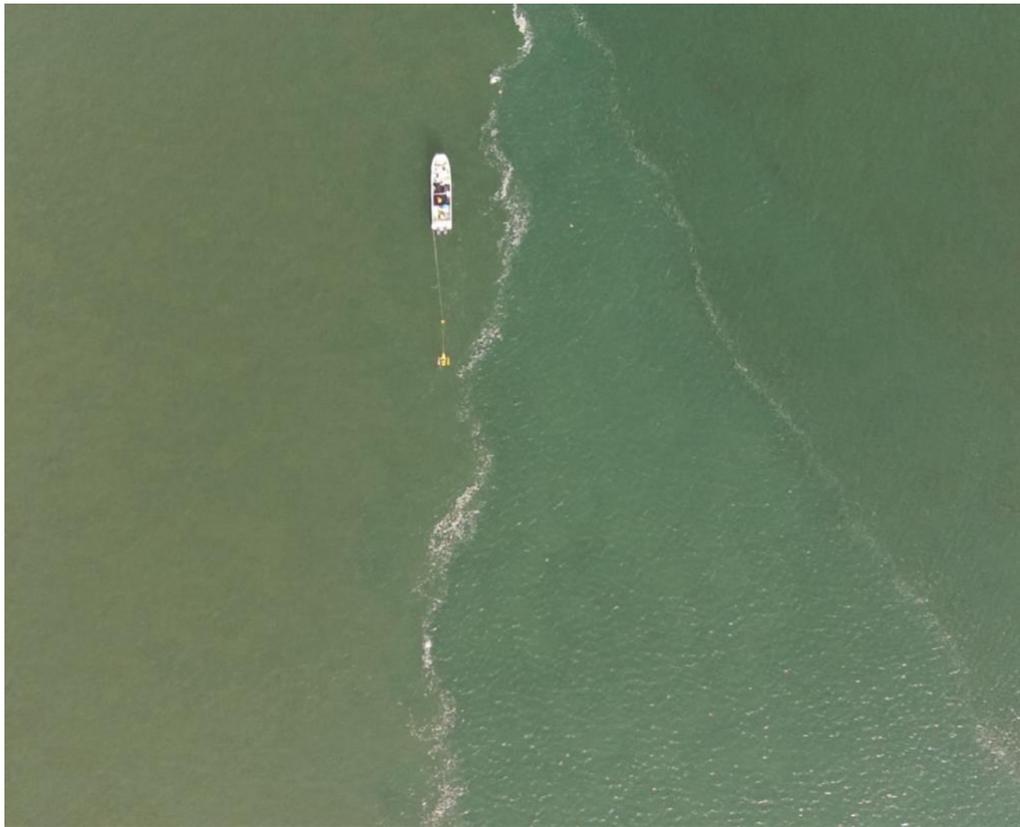


図 3.10 ADCP での測定時、ドローンのカメラを真下に向けて空撮した画像(14 時 49 分 20 秒撮影)
 フロント付近にて ADCP による測定が行われているほか、フロントが 2 つ見えている。



図 3.11 福岡県宗像市の位置 (左)、定点保持の観測を行った場所 (右) (Google Maps, 2024)



図 3.12 空撮により取得した画像。海岸に設置された構造物である離岸堤を 5 秒毎に連続撮影した。



図 3.13 建物に空間的局所最適化法を用いた結果。
構造物上のみで推定できていることから、定点保持の精度を検証できることが確認された。

第4章 フロント上の渦の高解像度推定

4.1 河川フロント上の渦の動きの推定

河川フロントのより詳細な形状変化を抽出するために2.4節に述べた空撮画像を解析するが、図2.9.1の左側の画像を拡大した、フロント上の渦を捉えている右側の画像を使用する。前処理を行った後に、特徴点の抽出を行ったところ、河川フロントやフロント上に形成している渦を中心に特徴点が抽出できた(図4.1)。また河川フロント以外の海面において特徴点が見られず、前処理によるノイズの低減に成功している。空間的局所最適化法を用いた、河川フロント上の流れ場の推定には画素領域としては今回の流速場を推定可能な最小範囲である 5×5 画素($0.2 \times 0.2\text{m}$)を用いた。その結果、図4.2のように河川フロントの流速場の推定ができた。ただし、背景流の影響が強いため、全体的に画像の左に流れており、見た目では渦の回転までを捉えているのかを確認することはできない。

推定した流速場が渦の動きを捉えることができているのかを確認するため、画像の各点において背景流による流速成分を除くことで、渦の動きのみを可視化したところ、渦が形成されている箇所と一致するように回転する流速が得られた(図4.3)。このことは空間的局所最適化法を用いることで、強い背景流が存在する流れ場の中に存在する河川フロント上の渦の回転などの、高解像度な流れ場の抽出が可能であることを示している。

4.2 渦の移動速度の抽出

次に、今回得られた流速場を用いて渦が河川フロント上をどのように移動しているのかを抽出する。河川フロントの形状は時々刻々と変化するため、渦の移動速度を抽出するには、渦の軌跡となる軸を基準として設定するのが有効である。渦の流速場から、今回の観測で捉えた渦は反時計回りに回転していることがわかる。よって、もし図4.4に示すように軸 $y = ax + \beta$ を基準として流速ベクトルを抽出することができれば、渦の右側では上向き、左側では下向きになるはずである。そして流速ベクトルの方向変化(上向きと下向き)の境の時間経過を追うことで渦の中心の移動速度が抽出できる。

そこで、本研究では以下の手法で軸の抽出および渦の移動速度の定量的に抽出する方法を提案する。ここでは、2019年10月2日9時57分23秒から58分14秒まで空撮された画像を用い、9時57分23秒の空撮画像を時刻0秒とする。

① 渦の移動前後の特徴点の位置から、渦の軌跡となる軸 $y = ax + \beta$ を求める

渦の軌跡となる軸 $y = ax + \beta$ の抽出には、渦の移動前後の時刻における特徴点の違いを利用する。ここでは、時刻18秒と時刻45秒の2つの時間差のある画像を用いて、それぞれ特徴点を抽出する。2つの画像は、どちらも渦が回転している様子が確認でき(図4.5)、且つ2つの画像間で渦の位置が変化していることがわかる。それぞれの画像から抽出した特徴点の位置を抽出し、特徴点が渦のみを捉えていると仮定し、全特徴点の座標情報を利用して最小二乗法に基づいて一次フィッティングすることで、渦の軌跡となる軸 $y = ax + \beta$ を決定した。この手法は、各画像において抽出した各特徴点の位置情報 (x_i, y_i) に対する軸との間の二乗誤差 E

$$E = \sum_{i=0}^n \{y_i - (y = ax_i + \beta)\}^2 \quad (23)$$

を最小とすることで、軸を決定することになる。ここで n は特徴点の抽出の総和である。 α, β において偏微分を行い、それぞれが0になる条件を求め

$$\frac{\partial E}{\partial \alpha} = \sum_{i=0}^n -2(y_i - \alpha x_i - \beta)x_i = 0 \quad (24)$$

$$\frac{\partial E}{\partial \beta} = \sum_{i=0}^n -2(y_i - \alpha x_i - \beta) = 0 \quad (25)$$

式(24)(25)を整理して、 α, β について解く。

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=0}^n x_i^2 & \sum_{i=0}^n x_i \\ \sum_{i=0}^n x_i & n \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \sum_{i=0}^n x_i y_i \\ \sum_{i=0}^n y_i \end{pmatrix} \quad (26)$$

軸 $y = \alpha x + \beta$ が渦の軌跡を近似的に表す直線だといえる。この最小二乗法による一次フィッティングはNumPyのnp.polyfit関数を用いた。

- ② 軸上にある全ての特徴点に対して、空間的局所最適化法を用いて流速を推定する
- ③ 得られた流速の、縦方向の平均流速を算出する
- ④ 各点の流速から全点を用いて求めた平均流速を引く
- ⑤ ②~④を繰り返す、ホフメラー図（縦軸：時間[sec]、横軸：空間スケール[cm]）を作成する（図 4.6）
図より、軸に対して上向きと下向きの流れの境目（流速がゼロになる点）の時間変化に着目し、その移動速度を求める。例えば図 4.6 のように、 $x = 1200\text{cm}$ にある流速がゼロになる点が移動し、51秒で $x = 236\text{cm}$ まで移動している場合、渦の移動速度は $(1200-236)/51 = 18.9\text{ cm/s}$ と求まる。

4.3 時間経過に伴う渦の移動

解析より求めた軸は、 $\alpha = 0.266, \beta = 234$ である（図 4.7）。この軸は時刻 21、27、33、39 秒においても、渦の中心付近を通ることが確認でき、時刻 18 秒から 45 秒の間の河川フロントの軸として適切だと思われる（図 4.8）。

決定した軸情報と空間的局所最適化法から、流軸上の流速を推定したところ海色から渦と思われる箇所は右側で上向き、渦の左側では下向きとなった。今後、渦として述べるのは海色から視覚的に渦のように見える現象のことを指す。ここで得られる流速データのうち、時刻 33 秒における縦方向の流速から縦方向の平均流速を引いた結果を画像中に表示すると（図 4.9）期待通り、軸上の渦の抽出に成功していることが確認できた。さらに解析時間を時刻 3 秒から 51 秒までに広げ、ホフメラー図を描いたものが図 4.10 である。図より、時刻 12 秒において $x = 1300$ から 1400 付近において下向きの流れがあり、流速がゼロとなる渦の中心（ $x = 1302\text{ cm}$ ）は時刻 12 秒から時刻 45 秒にかけて、図の左方向へと移動していることがわかる。

図 4.10 の白色の枠内である時刻 12 秒と 21 秒のときの可視画像と軸上の流速ベクトルを示したのが図 4.11 である。時刻 12 秒と 21 秒のどちらも軸上において、渦を中心に流速が右側で上向き、左側で下向きとなっていることが分かる。12 秒以前の流速分布では、同様の空間パターンが確認できなかった

ことから、時刻 12 秒のときは、渦の中心は $x = 1302$ cm 近傍に、時刻 21 秒のときは、 $x = 1041$ cm 近傍に確認でき、渦の移動速度は $(1302-1041)/(21-12) = 29$ cm/s であったことがわかる。

図 4.10 の黄色の枠内である時刻 24 秒と 27 秒のときの可視画像と軸上の流速ベクトルを示したのが図 4.12 である。時刻 27 秒では、流速ベクトルは渦の右側では上向き、渦の左側は下向きであることが確認できる。しかし、時刻 24 秒において流速ベクトルは概ね渦の右側では上向きであるものの、渦の左側も上向きとなっている。この理由は、時刻 24 秒における流速から平均流速を引いたときの流速場（図 4.13）が示すように、渦の右側は右上の向き、渦の左側では軸と並行な向きとなっている。つまり、時刻 24 秒における渦の左側の流速は流軸に沿った流れであり、左上に傾いている流軸成分を反映しているのではないかと推測する。

図 4.10 の黒色の枠内である時刻 36 秒と 45 秒のときの可視画像と軸上の流速ベクトルを示したのが図 4.14 である。時刻 36 秒では流速ベクトルは渦の右側で上向き、左側で下向きであり渦の中心（流速ベクトルがゼロの地点）は 384 cm であった。一方で時刻 45 秒では、渦の右側で下向き、左側で上向きであった。また時刻 12 秒から 45 秒まで図の右下から左上に移動していた渦の中心（流速ベクトルがゼロの地点）が時刻 45 秒を境に $x = 261$ cm あたりで途絶えていた。よって、時刻 45 秒において、ここまで議論してきた渦は消滅したと推測される。

時刻 12 秒と 36 秒における渦の中心位置の変化から推測される渦の移動速度は

$$1302 - 384[\text{cm}] / 36 - 12[\text{s}] = 38.3[\text{cm/s}]$$

である。

4.4 考察

空間的局所最適化法を用いた推定において、空撮画像で取得した河川フロント近傍の平均流速を求め、渦の移動速度を見積もった。移動速度は、河川フロントの平均流速と似た値を示していることから、河川フロント上の渦は背景流の影響で流されていると推測される。また渦の軌跡となる軸において渦の中心点を追跡すると、時刻 12 秒において渦が形成し、時刻 45 秒において渦が消滅しており、渦の寿命はおよそ 33 秒であった。よって渦は定常な形を保ったまま流されているわけではない。

今回の観測では、渦の形成は、流速ベクトルが右側で上向き、左側では下向きという特定のパターンを示し始めるときであり、図 4.11 に示すように形成直後の時刻 12 秒においては渦の流速ベクトルの速い箇所が分布は狭いものの、時刻 21 秒には渦状には幅広くなっている。このことから渦の流速ベクトルの分布の拡大からも渦の形成を知ることに繋がるのではないかと考える。一方で渦が消滅する際は、渦の回転方向が逆になっていることが確認された。また渦の消滅に関して、流速ベクトルの分布が小さくなることや、波の破波のような挙動を示しているのではないかと考える。図 4.13 に示すように途中の時刻 24 秒において可視画像でみえる渦の位置と流れ場で想定される渦の中心が一致せず、背景流と同じ向きであり、時間とともに流れ場と河川フロントの形状が次第に一致しなくなっている様子が見える。

以上のことから、空間的局所最適化法を用いた流軸の決定と流れ場の推定から、渦を解像できるような高解像度で流れ場を捉えることができることが明らかになった。連続した空撮画像からは渦の移流と寿命を定量的に評価することが可能である。

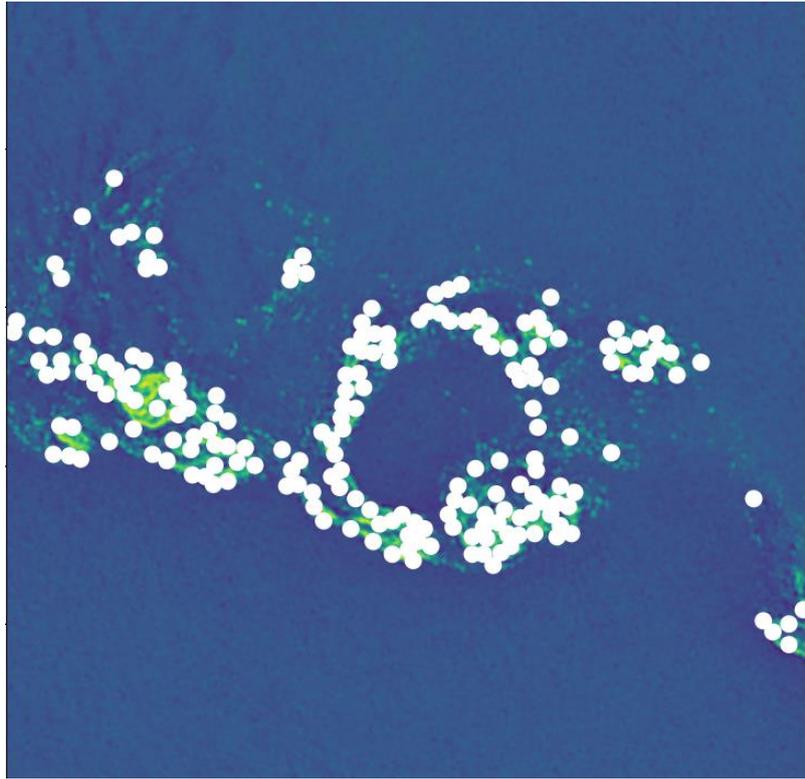


図 4.1 画像から特徴点を抽出した結果、河川フロントやフロント上に形成している渦を中心に特徴点を捉えることが確認できる（白色の丸）。

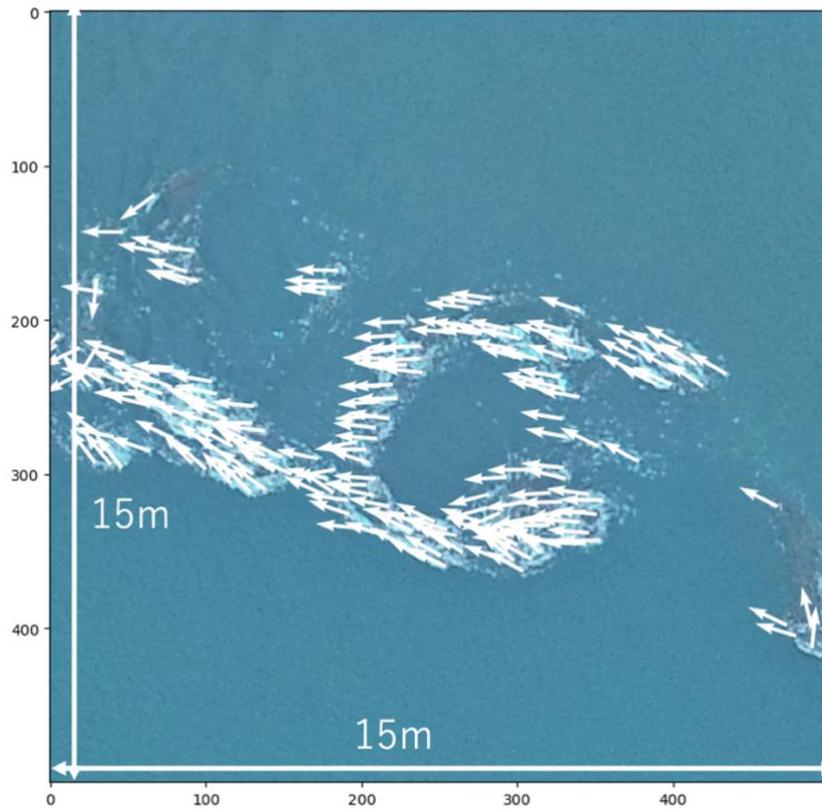


図 4.2 河川フロントの流速場の推定結果、背景流の影響が強く全体的に図の左に流れており、見た目では渦の回転までを捉えているのかを確認できない。

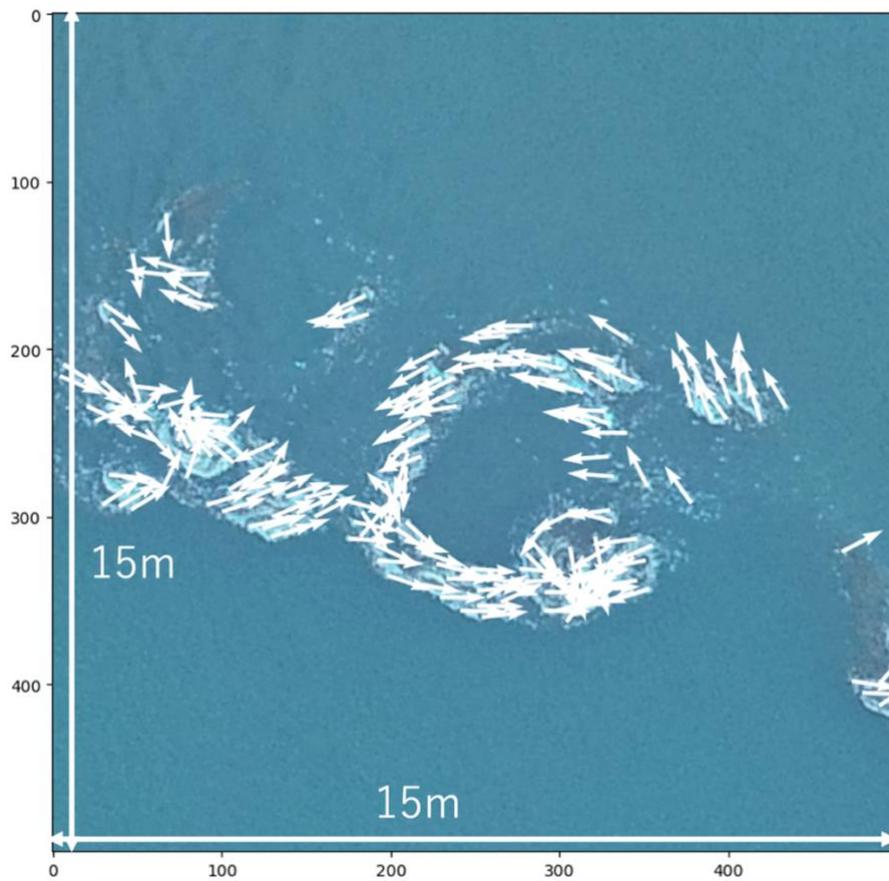


図 4.3 流速ベクトル分布（流速-平均流速）から、渦の回転を可視化することができる。

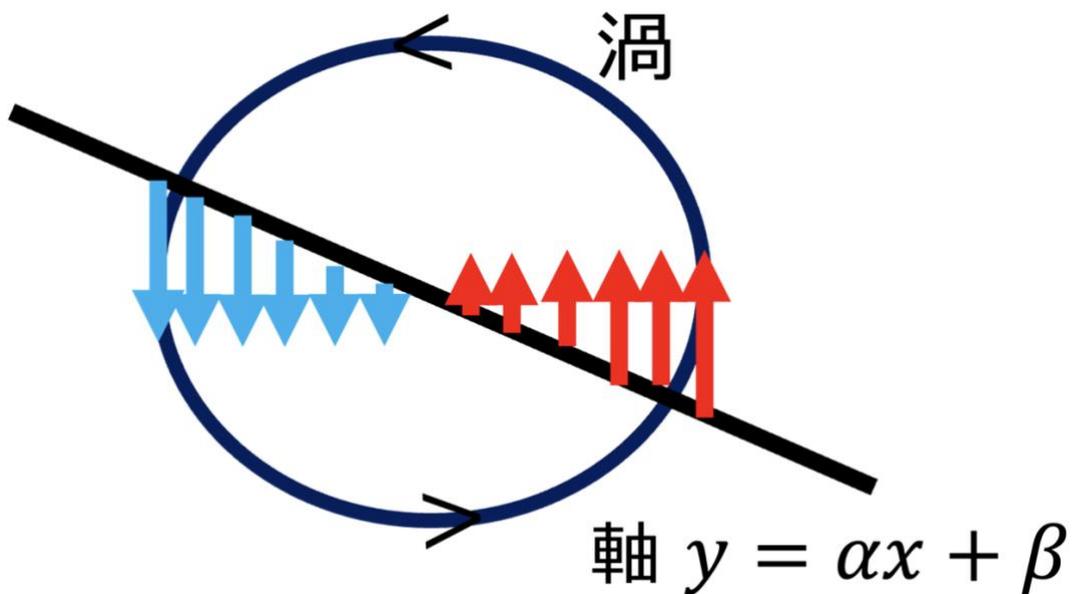


図 4.4 軸を基準として縦方向の流速から縦方向の平均流速を引いた流速ベクトルを抽出することで、反時計回りの渦では渦の右側では上向き、左側では下向きになるという予想図。

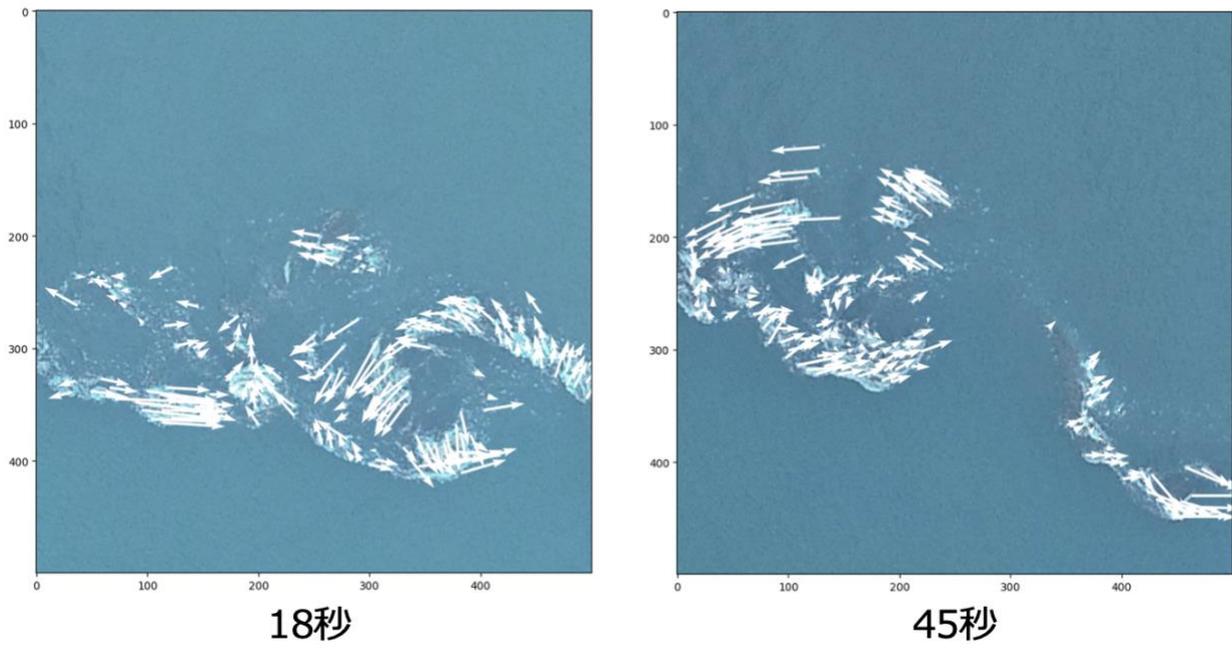


図 4.5 時刻 18 秒と 45 秒における渦の流れ場

両時刻の結果より、渦の回転を捉えることができていることが確認できる

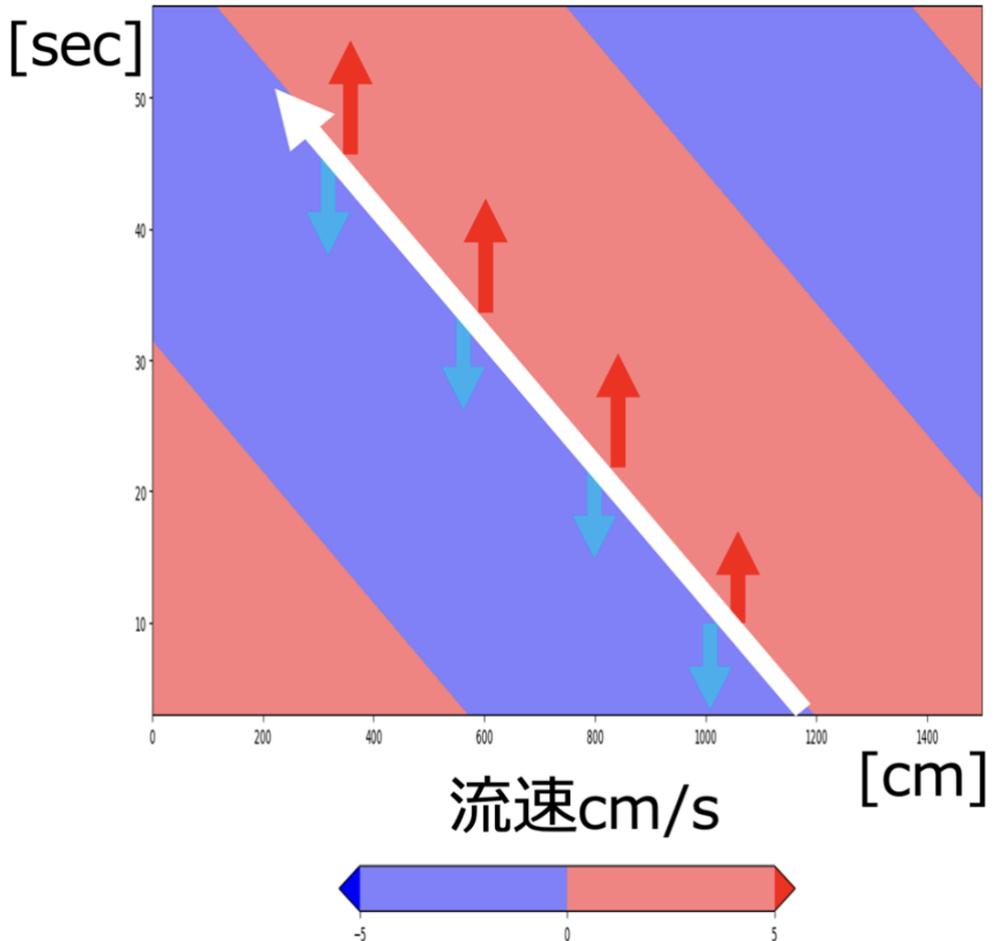


図 4.6 軸を基準とした流速ベクトルの時間経過の模式図
流速が負を青色、正を赤色で表している

18 s の特徴点 → ●
45 s の特徴点 → ×

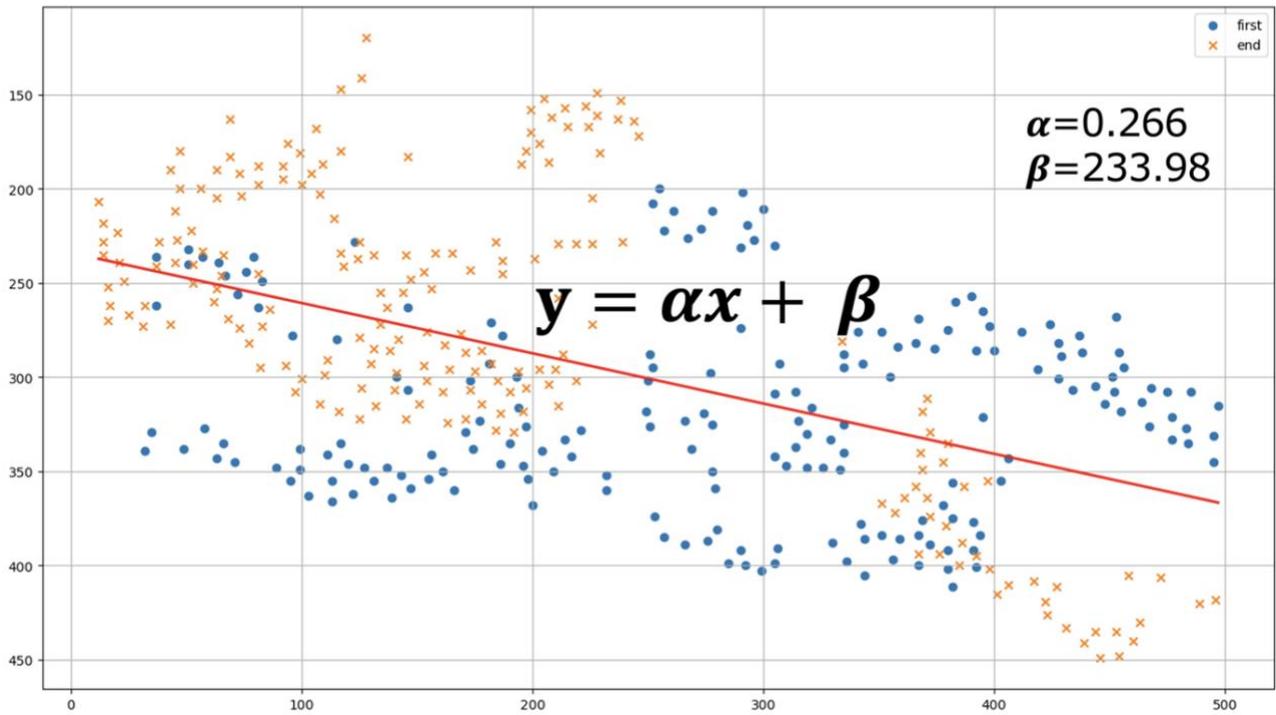


図 4.7 時刻 18 秒と 45 秒における全特徴点の座標情報を利用して一次フィッティングすることで渦の軌跡となる軸 $y = \alpha x + \beta$ を求める。

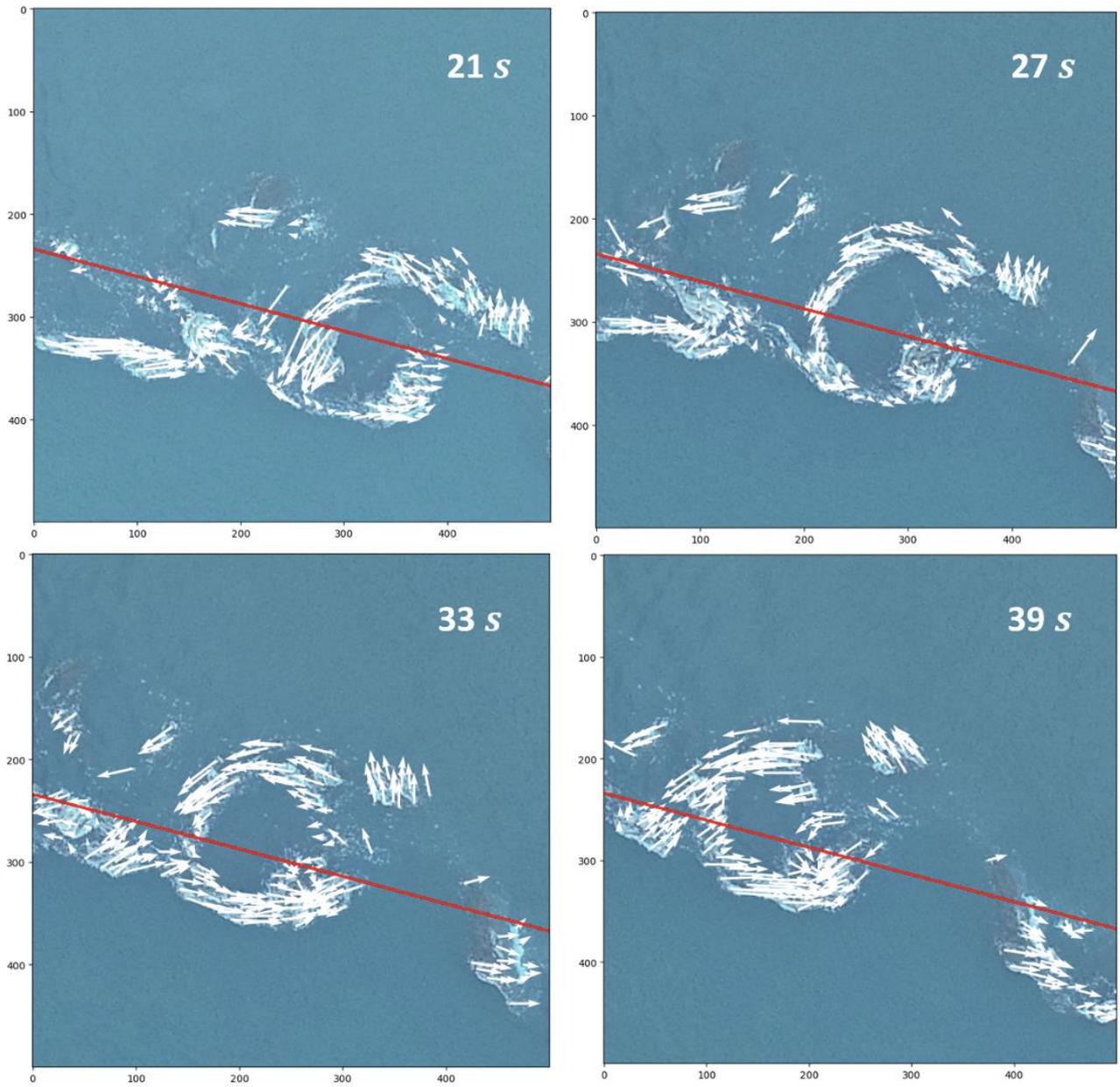


図 4.8 各時刻における渦の流れ場（流速 - 平均流速）と 4.2 節の手法で決定した軸の位置関係

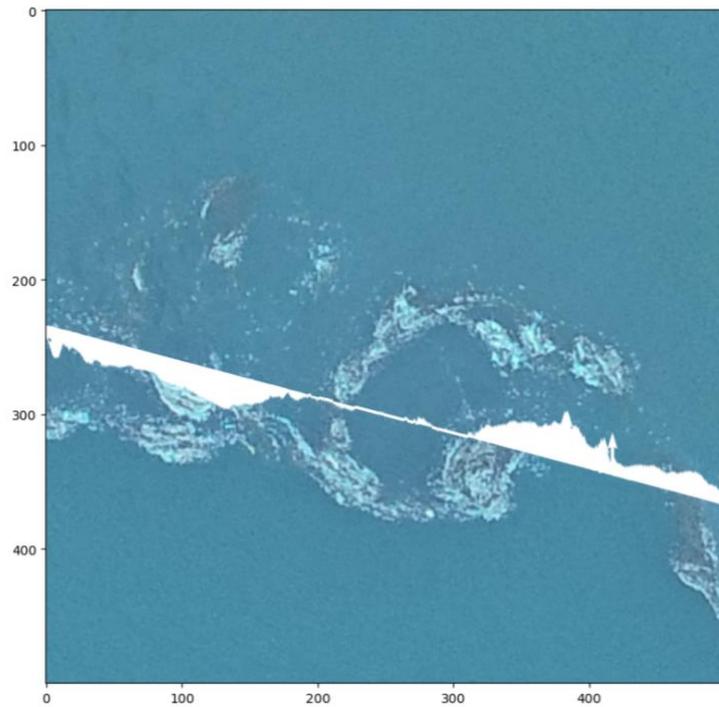


図 4.9 渦の軌跡となる軸上における推定結果のうち、時刻 33 秒における縦方向の流速から縦方向の平均流速を引いて画像にプロットしている。

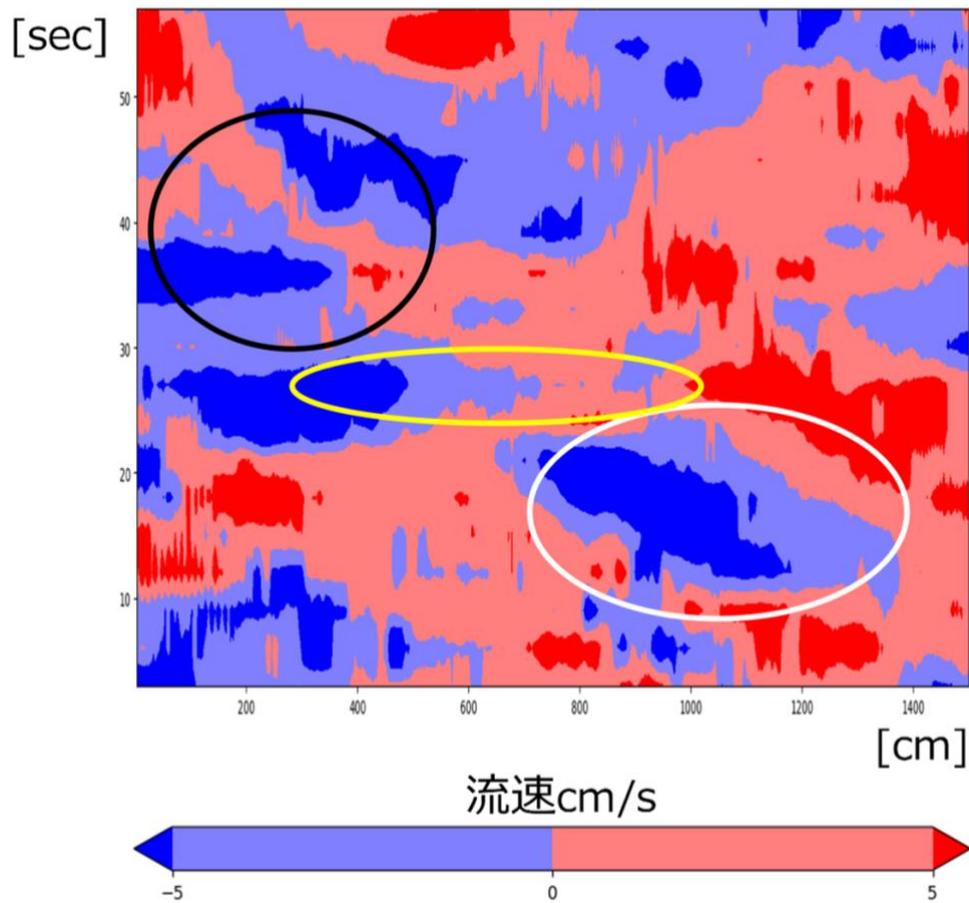


図 4.10 軸上の流速ベクトル結果（縦方向の流速 - 縦方向の平均流速）を時刻 3 秒から 51 秒まで用いて作成したホフメラー図。

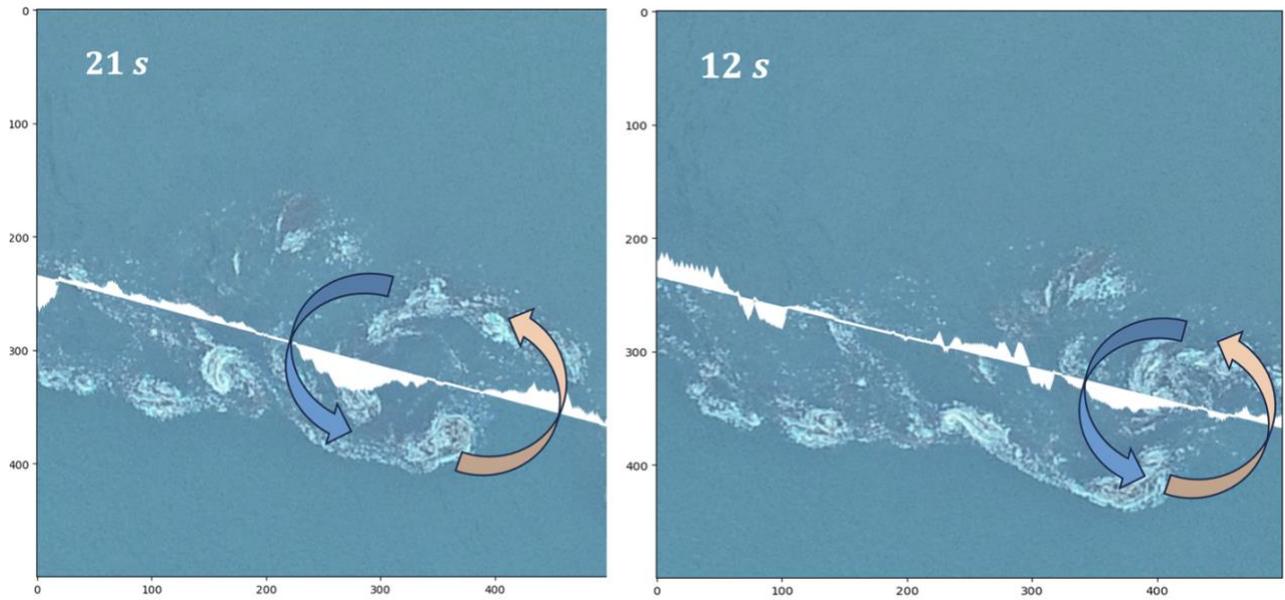


図 4.11 図 4.10 の白色の範囲である時刻 12 秒と 21 秒における渦の空間分布と軸上の流速ベクトル。両時刻にて渦の右側では上向き、左側では下向きという期待通りの挙動を示している。

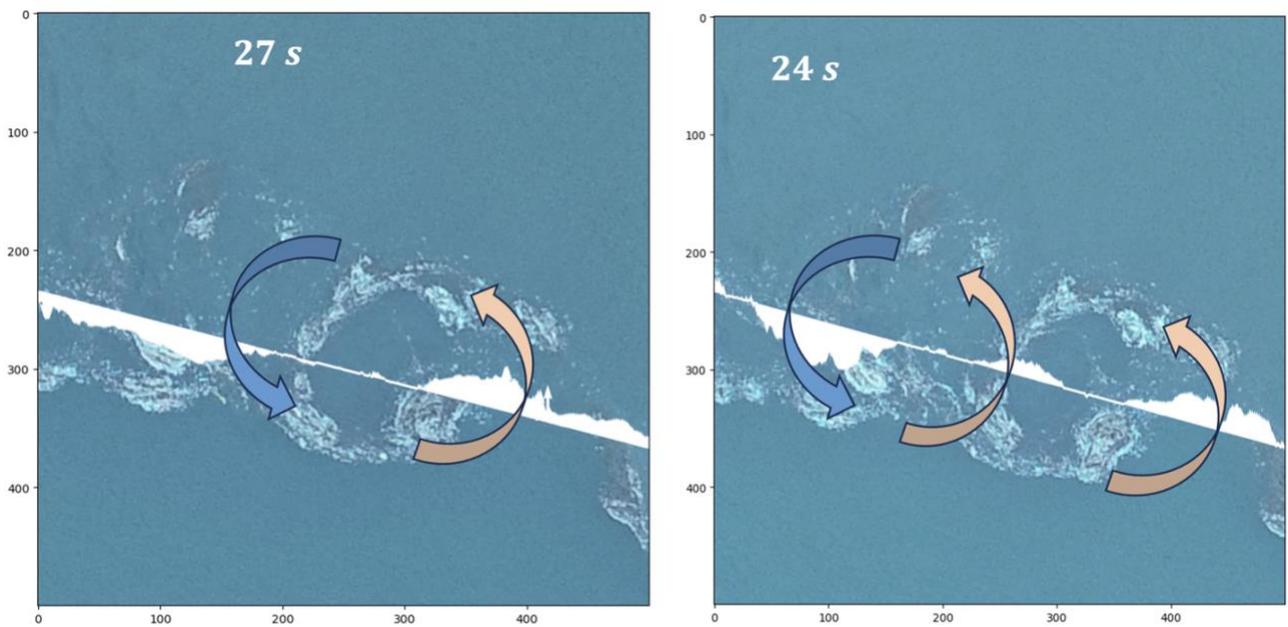


図 4.12 図 4.10 の黄色の範囲である時刻 24 秒と 27 秒における渦の空間分布と軸上の流速ベクトル。時刻 27 秒では期待通りであるが、時刻 24 秒では渦の左側で上向きとなっている。

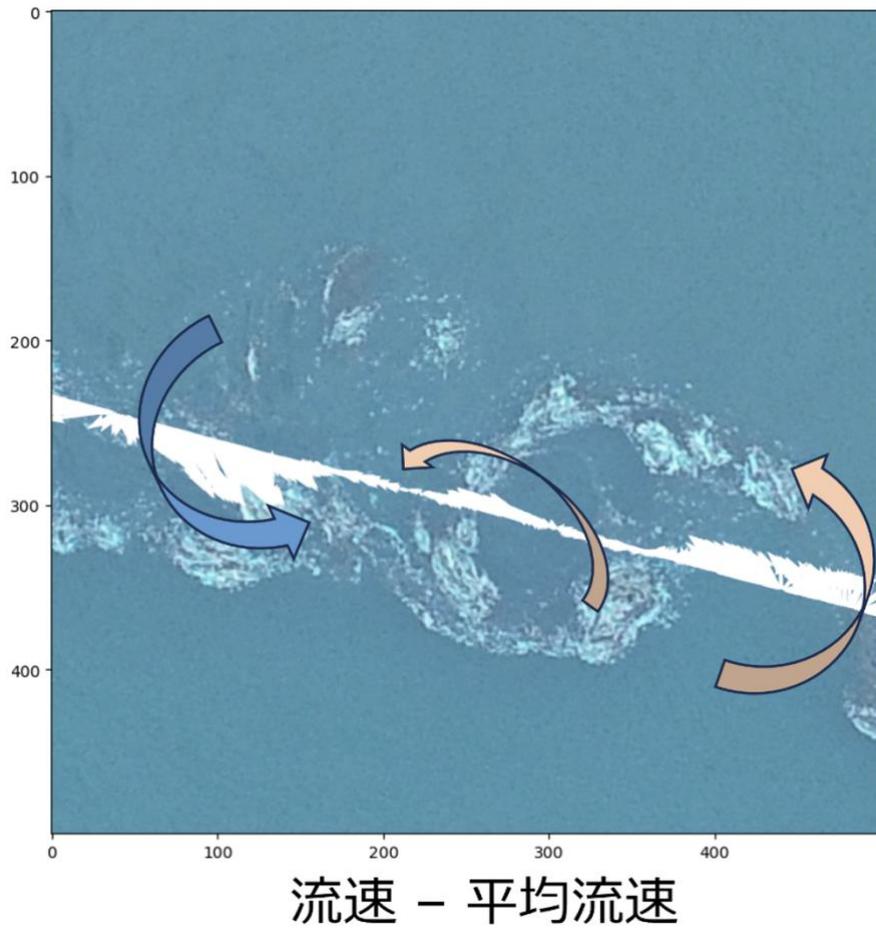


図 4.13 時刻 24 秒における流速から平均流速を引いた推定結果。
渦の左側では流軸方向に流れていることがわかる。

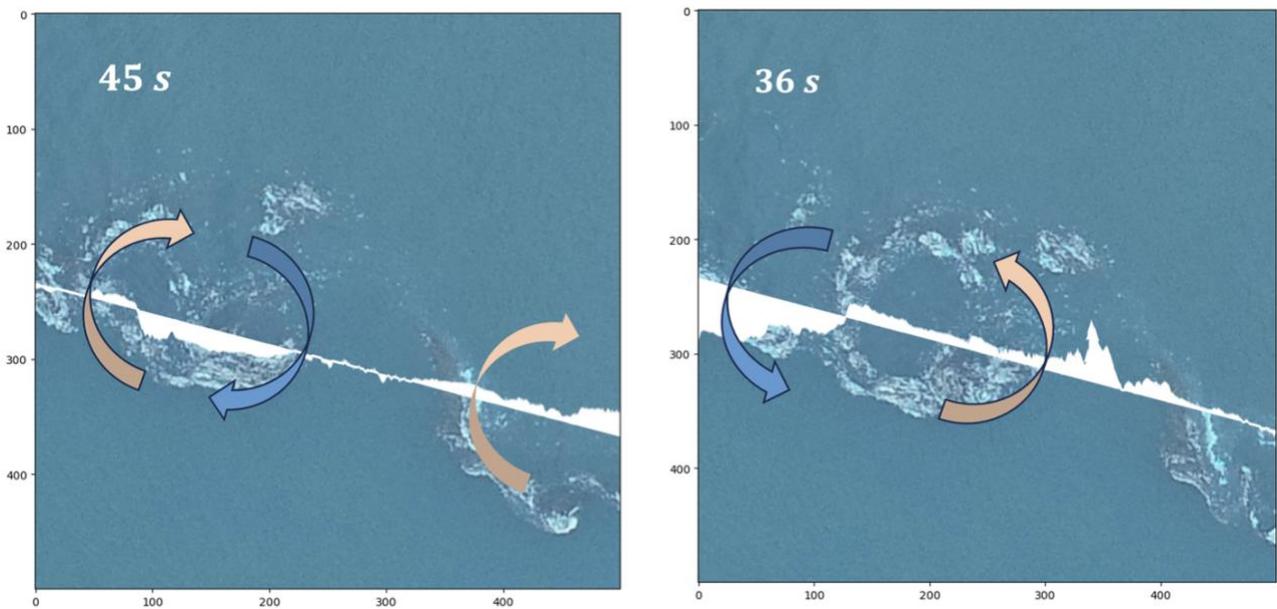


図 4.14 図 4.10 の黒色の範囲である時刻 36 秒と 45 秒における渦の空間分布と軸上の流速ベクトル。
時刻 36 秒では期待通りの挙動であるが、時刻 45 秒ではこれまでと反対のパターンを示している。

第5章 まとめ

本研究の目的は2つある。1つ目が、ドローン空撮により数秒および数 m スケールで変化する河川フロントを数 cm 程度の空間解像度で広範囲にわたって観測することである。2つ目が、ドローン空撮で取得した時間的に連続する画像からフロント上の渦の動きを推定することである。

河川フロントを広範囲に観測するため、空撮ドローンのカメラを斜め45度に傾ける手法に挑戦した。北海道・厚岸湾の上空140mにて観測を実施し、空撮ドローンから河川フロントを広範囲にわたって空撮することに成功した。また空撮画像を用いて河川フロントの流速場を推定するにあたり、撮影環境による推定結果への影響を除くために前処理を行うことで、口径食や海面のノイズの影響を低減し、斜めに空撮した画像を直下の画像に射影変換した。このような前処理を適切に行なった画像に対して空間的局所最適化法を用いることで、数秒・数メートルスケールで変化する河川フロントの流れ場を推定できることを示した。推定結果は、流れ場が厚岸湾から厚岸湖に近づくにつれて、流れの向きが徐々に変化している分布を持っていることがわかった。このような空間変化は直下で空撮したような撮影範囲が狭い画像では、明らかにすることができなかつた流れ場である。このことより、空撮ドローンのカメラを斜めに傾けて観測することで、一度に広範囲の河川フロントを捉えることができることが明らかになった。

空撮ドローンで撮影された可視画像から河川フロント上の渦に伴った流れ場を高解像で推定することを試みた。まずRGB色空間からCIE Luv色空間に変換を行い、明るさの情報を利用でき、かつ線形的な解析を実現した。フロント上に形成された渦の動きは、背景流の成分を取り除くことで確認でき、空間的局所最適化法が、画像相関法では困難であった渦が回転する流れ場を捉えることが可能であることを示した。さらに渦の軌跡となる軸を設定し、軸上に沿った渦の中心位置の時間変化を追跡し、渦の移動速度を明らかにした。また流速ベクトルが特定のパターン(渦の右側では上向き、左側では下向き)を示し始める時刻から渦の形成、流速ベクトルが反対のパターンを示し始める時刻から渦の消滅、を特定できることもわかった。本論文で提案する解析方法によって、渦の寿命(形成から消滅まで)の時間スケールを定量的に評価できることが明らかになることができた。今回の解析時間は57秒間と短かつたため、一つの渦の動きのみしか捉えることはできなかつたが、さらに解析時間を延長することで渦の長期的な挙動や複数の渦間の相互作用、さらには風の影響などを検証できるようになることを期待したい。

参考文献

1. 森永晋之介 (2018) : ドローン空撮を用いた沿岸海洋過程の熱赤外リモートセンシング、九州大学総合理工学府大気海洋環境システム学専攻修士論文
2. 石元伸 (2019) : ドローンによる沿岸海洋過程の高解像観測手法の開発、九州大学総合理工学府大気海洋環境システム学専攻修士論文
3. 阿部稜 (2020) : 画像相関法による河川フロント上の速度場の推定、九州大学総合理工学府大気海洋環境システム学専攻修士論文
4. N.Taniguchi, S.Kida, Y.Sakuno, H.Mutsuda, and F.Syamsudin (2019).Short-Term Variation of the Surface Flow Pattern South of Lombok Strait Observed from the Himawari-8 Sea Surface Temperature, Remote Sens., 11, 1491
5. 高見健大朗 (2022) : ドローンとラジコンボートによる河川フロントの観測、九州大学総合理工学府大気海洋環境システム学専攻修士論文
6. Google, Google Maps, (閲覧日 2024/01/30)
(URL: <https://www.google.co.jp/maps/>)
7. DJI, P4 Multispectral Image Processing Guide, (閲覧日 2024/01/31)
(URL:https://dl.djicdn.com/downloads/p4-multispectral/20200717/P4_Multispectral_Image_Processing_Guide_EN.pdf)
8. R. M. Zain, A. M. Razali, K. A. M. Salleh & R. Yahya(2017) .Image reconstruction of x-ray tomography by using image J platform, pages 050010-3.
9. 宮崎大輔, 四角形から四角形への変換, (閲覧日 2024/01/29)
(URL:<http://www.info.hiroshima-cu.ac.jp/~miyazaki/knowledge/tech0115.html>)
10. C. Harris & M.J. Stephens.A (1988). Combined corner and edge detector. In Alvey Vision Conference, pages 147–152.
11. B. D. Lucas & Kanade T (1981). An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision," DARPA Image Understanding Workshop, pp 121-130.

謝辞

本研究を行うにあたり、研究室に配属された時から今日に至るまでの約2年間、熱心な御指導ならびに御鞭撻賜りました九州大学応用力学研究所の木田新一郎准教授に心から感謝申し上げます。木田准教授は、社会人として必要となるスタンス面やスキル面を見据えて御指導して頂きました。そのお陰で学部時代は苦手であった人前でのプレゼン力や文章力などを身につけ、この2年間で成長することができました。ここに一つ研究の成果をまとめることが出来たのは、木田准教授の励ましのお言葉と勇気づけがあってこそだと感謝申し上げます。

磯辺篤彦教授、上原克人助教授からは、ゼミで発表時に研究内容の要点を押さえた貴重な助言を何度も頂きました。助言によって、新たな気づきを得ることができ、研究活動における励みになりました。感謝申し上げます。

東京大学大気海洋研究所の田中潔准教授、北海道大学北方生物圏フィールド科学センターの伊佐田智規准教授、北海道大学低温科学研究所の中村知裕先生、北海道大学厚岸臨海実験所の職員の方々には厚岸での観測において、観測時の助言や観測データを提供していただき大変お世話になりました。感謝申し上げます。

研究室の技術職員の皆様ならびに秘書の皆様には、研究活動や日常生活において、温かいサポートをして頂きました。御礼申し上げます。

最後に、これまで私を経済面や生活面で常に応援してくれた両親に感謝申し上げます。両親の支援があつてこそ、素敵な環境下で勉学に思う存分励むことができました。ありがとうございました。

大学院での経験は、専門知識だけでなく、社会で活躍するためのスキルやスタンスを身につけることができる貴重な経験でした。社会に出てからもこれまで学んだことを活かし、自らの能力を高め続けることで社会に貢献できる人間になるよう努めます。