

ドローンとラジコンボートを用いた河川フロントの 観測

高見, 健大朗
九州大学大学院総合理工学府大気海洋環境システム学専攻

<https://hdl.handle.net/2324/4776859>

出版情報：九州大学, 2021, 修士, 修士
バージョン：
権利関係：



令和 3 年度

九州大学大学院総合理工学府

大気海洋環境システム学専攻修士論文

ドローンとラジコンボートによる

河川フロントの観測

氏 名 高見 健大朗

指導教員名 磯辺 篤彦 教授

木田 新一郎 准教授

目次

第1章 はじめに.....	4
1.1 研究背景.....	4
1.2 沿岸域における観測手法の先行研究.....	4
1.3 研究目的.....	5
1.4 論文の構成.....	7
第2章 空撮と直接観測を組み合わせた河川フロントの観測手法.....	8
2.1 空撮ドローンによる観測.....	8
2.2 マルチスペクトル画像の解析方法.....	8
2.2.1 DJI 社により公表されている解析方法.....	8
2.2.2 これまでの画像解析と今回の画像解析の比較.....	11
2.2.3 マルチスペクトル画像の有用性.....	12
2.3 水塊データのセンサーと搭載したボートによる観測.....	12
2.4 大槌湾での観測.....	13
2.5 厚岸湾での観測.....	13
第3章 大槌湾の観測データの解析結果.....	20
3.1 大槌湾での観測.....	20
3.1.1 観測の実施.....	20
3.1.2 空撮ドローンによる観測.....	20
3.1.3 水上ドローンによる観測.....	21
3.2 大槌湾観測についての考察.....	21
第4章 厚岸湾の観測データの解析結果.....	31
4.1 厚岸湾での観測.....	31
4.1.1 観測の実施.....	31
4.1.2 空撮ドローンによる観測.....	31
4.1.3 水上ドローンによる観測.....	32
4.2 厚岸湾観測についての考察.....	33
5章 まとめ.....	47

Abstract

本研究の目的は、河川水と海水の境界である河川フロントを詳細に観測する手法の開発である。これまで河川フロントの時空間変化は大きく、既存の観測手法だけでは河川フロントにおける海水と河川水の混合過程を観測することが難しい。そのため、河川フロントを対象とした新たな観測手法として、空撮ドローンを用いた上空からの撮影と水上ドローンを用いた水温・塩分・クロロフィル(水塊)データの直接観測を組み合わせる観測手法を考案し、大槌湾と厚岸湾にて実験的に観測を行った。空撮ドローンによる観測では可視カメラとマルチスペクトルカメラにより上空から河川フロントの撮影を行う。また、水上ドローンによる観測ではロープに一定の間隔で取り付けられた観測器を垂下させることで水塊データを直接観測する。

大槌湾では本研究の観測手法で初の観測を実施し、本研究の観測手法が河川フロントの観測手法として有効である可能性が高いことを確かめた。河川フロントが弱く、目視では色の違いが分かりにくかったが、空撮により取得した各波長のマルチスペクトル画像を用いてスペクトル値を比較したところ、フロントを境に値の大きさに差があることが確認できた。水上ドローンにより測定した水塊データでは河川フロントの位置で急激な変化が見られ、水上ドローンに観測器を垂下させることで河川フロントを観測できることが分かった。また、空撮と直接観測の同時観測によって空撮と直接観測の位置の同期も可能であることも確かめられた。

厚岸湾では大槌湾で得た観測結果を元に改良した観測を実施し、空撮・水上ドローンを用いた観測手法が河川フロントの観測手法として十分に活用できることが確認できた。空撮では、河川水と海水の色の差が大きかったことから明確な水平構造を観測することができた。また、水上ドローンでの観測では、厚岸湖の水深が浅いことから、水面から湖底までの全ての水塊データが観測することが可能であった。河川フロントの断面構造を観測することができ、河川水の層と海水の層の厚さや混合が起きている可能性があるポイントが特定できるほどの精度であった。

以上から、河川フロントの観測手法として空撮ドローンによる可視・マルチスペクトル撮影と水上ドローンによる水塊データの直接観測は有効であり、この観測手法を活用することで河川フロントでの河川水と海水の混合過程を解明することにつながると考えられる。

第1章 はじめに

1.1 研究背景

河川は地球表面の水の循環を行い、地球上の生物や環境にとって非常に重要である。水は地球表面に様々な状態で存在しており、海水が大部分の約 95%、氷河と積雪が約 2%、地下水が約 2%、その他微小部分として永久凍土や湖がある。また、大気中の水蒸気量として約 0.001%存在している。しかし、私たちが注目する河川水の総量は、これらと比較して非常に小さい約 0.0001%である。水の総量としては小さい河川だが、水循環の重要性は循環の速さにもあり、その点で河川は大きな役割を担っているといえる。河川は主に、陸地に降り注いだ雨水を河川水として海に流出することで水循環を行っている。地球上の陸地における降水量の約 40%が河川水として海に流出しており、また、日本においては地形的特性から降水量の約 70%が河川水として海に流出しているとされている。これらから水循環に河川が大きく関わっていることが分かる。河川は海に淡水を供給するだけでなく、栄養塩、土砂を供給する。これらのうち、特に栄養塩は海洋生物が生きるうえで必須であり、養殖や漁業など水産資源の生産に大きく関わり、淡水や土砂の流入も併せて河川は海洋環境形成に大きな影響を与えている。近年では、人間活動による農業用水、工業用水、都市用水として全河川流出量の約 10%が消費されていることやダムの建設、河口改修、気候変動による降雨量の変化から河川水の減少が起き、水域の環境悪化、生態系の崩壊、漁業の壊滅を引き起こしている(宇野木ら, 2008)。

このように河川は地球環境や社会に対して大きな影響を与えるが、その流出過程は非線形性や非定常性が高く、未解明な部分が多い。そこで我々は河川フロント(図 1)に注目し、新たな観測手法の導入によって流出過程の解明を目指す。なお、河川フロントとは流出河川水と海水の境界の構造であり、海水と河川水の混合域となっている。河川フロントには浮遊ごみや泡が筋状に集積することが多くフロントを境に水塊特性が分かれるため海色の差がはっきり表れる傾向にある。このような河川フロント構造の特徴を観測することで、河川水の混合過程や流出過程の解明につながると考えられる。

1.2 沿岸域における観測手法の先行研究

これまでの沿岸域の観測としては、船舶による定線観測が主流であった。長期的な海況変化の理解には、現行の月一度の散発的な船舶定線観測ではなく、定点係留観測が望ましいが、そもそも漁場や海運に需要の多い沿岸水域を観測で占領することは難しく、継続的な観測は難しい。そのため、沿岸海域では重要な物理過程が持つ時間スケールに対して十分な精度をもったデータを得ることができないという問題があった。1980 年代以降は、新たな観測手法として衛星観測が加わった。しかし、衛星観測では物理過程のスケールに対して空間解像度が粗いことや雲域で観測が中断されることが多く、1km 以下のスケールの小さな領域かつ時々刻々変化する沿岸海域の観測は向いていないという問題があった。このように、沿

岸海域の物理過程は、既存の観測手法では捉えることが難しい。沿岸海域における物理過程の研究には沿岸海域に特化した新たな観測技術の開発が必要である（岡ら, 2013）。

そこで、より沿岸域の観測に適したリモートセンシング技術として、航空機や船舶曳航式のバルーンが使用されてきた。航空機での観測は高度数百 m 程度からの可視観測が可能だが、持続的、継続的な観測を行うにはコスト面が高い。一方で、船舶曳航式のバルーン観測は 1 度ヘリウムを入れてしまえば長時間にわたって実施することが可能である。バルーンに傾斜センサーを搭載し、計測されたピッチ角やロール角、方位角を利用することで GPS 搭載のブイなどの海面の基準点を不要とするスタンドアローン化に成功した例もある（山本, 2017）。しかし、バルーン観測は観測領域が船による曳航速度に制限されてしまうため、機動性に欠け、観測範囲も限定されてしまう。また、空撮画像に船跡が写ってしまうことも多い。そのため、時空間的な変動の大きな沿岸海域における観測手法として最適とは言えない。

以上のことから、物流や農業など、近年様々な場面で活用されているドローンを沿岸域の観測に導入する試みがなされてきた。ドローンは、低コストでありながら機動力が高く、高解像度な観測が可能である。これまでに、森永(2018)は熱赤外カメラを搭載したドローンを使用することで、広範囲の熱赤外リモートセンシング手法の確立を目指し、河川フロントを挟んだ水温のコントラストの検出に成功している。また、石元(2019)は可視カメラを搭載したドローンで、1 km²の範囲かつ 5 cm 程度の超高解像度での河川フロント観測も成功されている。そのデータから海色を抽出することにより、クロロフィル濃度の判定もできる可能性も示唆されている。また、阿部(2021)は画像相関法で可視画像から河川フロント上の速度場を求めることに成功している。

1.3 研究目的

本研究の目的は、河川フロント構造をメートル以下の空間スケールで詳細に観測する手法の開発である。これまではドローンと搭載された可視カメラのみでの観測が行われてきた。しかし、現在の観測手法では、以下に述べる通りに「ドローン空撮のみでは実際の水塊データが分からない」、「可視画像は解析の際の問題が複数存在する」という課題がある。これらの課題を改善する新たな観測手法の提案が本研究の目的である。

まず、一つ目の「実際の水塊データが分からない」という課題についてである。これまでの空撮観測では、海面に浮遊する泡や海藻などが河川フロント上に集積することによって形成される線構造や、河川フロントを挟む海水と河川水の海色観測されてきた。これにより河川フロントの位置や形状を観測することができたが、上から見た構造のみでは実海洋の水塊データを得ることはできず、海中の河川フロント構造や水の混合過程と、上空からの観測との対比ができなかった。そこで、塩分・水温・クロロフィルデータ(以降、水塊データ)の直接観測をドローン空撮と組み合わせ、河川フロント上の水塊データを得ることで、空撮画像で捉えられている河川フロントの海中の構造や水の混合過程の解明を試みた。直接観

測には、観測センサーを海中に垂下させた水上ドローンを使用し、河川フロントの連続横断観測を行う。点の観測でなく線上での連続観測を行うことで、河川フロントを挟む水塊データの推移を観測でき、海水混合過程の解明につながることを期待できる。

二つ目に、「可視画像は解析の際の問題が複数存在する」という課題についてである。一点目として、可視画像の赤/緑/青(RGB)の三種類の組み合わせでは表現できない色が存在するという点である。表現できない色は大体 440~550nm の波長帯に存在しており、色でいうと青から緑のあたりである。我々の観測対象の海は青や緑であることから可視画像では正確に色が観測できないと考えられる。また、表すことができない色は人間の視細胞の感度で感じられない程度に変換が施されたうえで出力されている。そのため物理的に正しい色であるといえず海色の解析には適さないといえる(DIC カラーデザイン株式会社 HP：色彩関連情報)。二点目として可視画像は周囲の明るさによって変化した色の明度を補正することが難しいという問題がある。我々は野外の海で観測を行っているが、太陽高度の変化や雲の存在により常に周囲の明るさが変化しており、それに伴って観測している可視画像の値も変化してしまう。そのため、河川フロントの色の時間変化を捉えるために、ホバリング撮影を行ったとしても、太陽光の変化による RGB 値の変化が生じてしまう。また、補正するためのデータも不足している。そこで、本研究では、可視カメラに加えてマルチスペクトルカメラをドローンに搭載し観測を行う。マルチスペクトルカメラでは、特定の波長帯の反射スペクトル値の強さを観測しており、観測時に太陽光の強さを観測しておくことで画像を解析する際に太陽光の反射スペクトルの影響を補正することが可能である。つまり違う時間帯での海色の比較や時間変化の観測を行うことが可能になる。さらに、可視画像は各波長に対して 256 段階での観測を行っているが、マルチスペクトル画像は 1000 段階程度であり、色に対する解像度も圧倒的に大きい。また、可視画像では色空間が非線形であることから、解析の際に線形に変換する必要があるが、マルチスペクトル画像はその必要がないため、解析の手間も少ない。このようにマルチスペクトル画像には可視画像より優れた点が多くあるが、マルチスペクトル画像では、その場ですぐにフロント構造を確認したい場合でも可視化の作業が必要になる。その点で、可視画像は撮影した画像をその場で確認することが可能で便利である。そのため、可視画像とマルチスペクトル画像を組み合わせることで効率よく正確な観測を行えると考えた。

また、可視画像、マルチスペクトル画像に共通した問題として、口径食、露光時間、アナログ値からデジタル値への補正值など複数の要因による誤差がある。これらの効果は解析する際に校正する必要がある。本研究では DJI 社のドローンに搭載されている DJI 社製のカメラを使用しているため、DJI 社が公表している校正方法を参照して各画像の校正を行っている。

このように「水塊データの直接観測と空撮を組み合わせる」、「空撮にマルチスペクトルカメラを使用する」という新たな手法で、より詳細な河川フロント観測を目指す。大槌湾と厚岸湾で実験的に観測を行った。

1.4 論文の構成

本論文は全 5 章で構成されている。ここまでの第 1 章では、河川が地球環境に及ぼす影響や、これまでの沿岸域の観測手法、本研究室で研究されてきた河川フロントの観測手法について述べた。また、より詳細に河川フロント観測を行う手法の開発が本研究の目的であることを示した。これ以降の第 2 章では、本研究で使用した空撮ドローンと水上ドローンによる沿岸域の観測手法、新たに考案した空撮と直接観測を組み合わせる観測手法について述べる。第 3 章では、大槌湾で取得した河川フロントのデータを解析した結果と考察を述べる。第 4 章では、厚岸湾で取得した河川フロントのデータを解析した結果と考察を述べる。第 5 章では、以上の結果を総括し、本論文の結論とする。

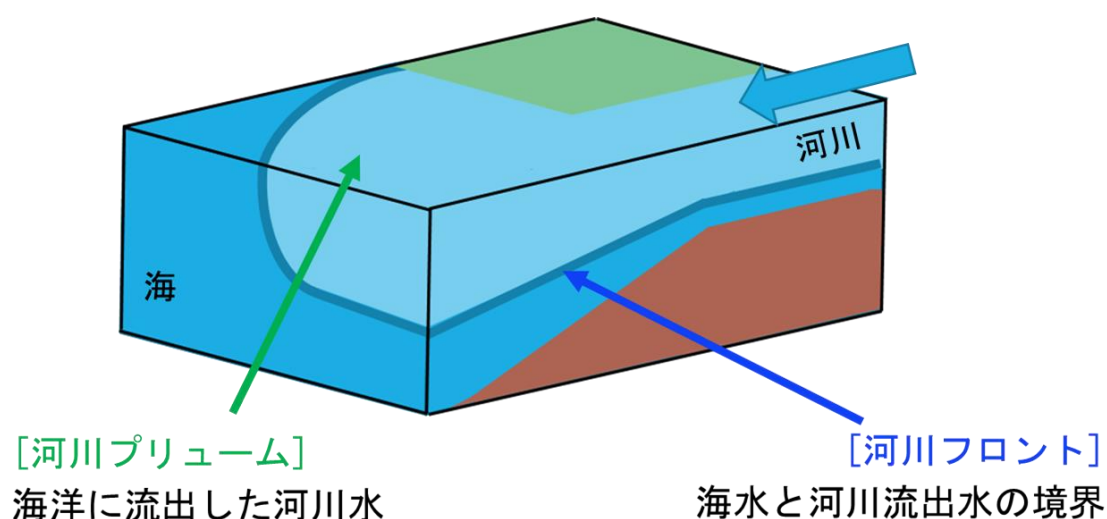


図1 河川フロントのイメージ。沿岸域の断面図を示している。右側の河口から河川水が流入しており、薄い青色が河川水、濃い青が海水である。境界部分が河川フロントである。

第2章 空撮と直接観測を組み合わせた河川フロントの観測手法

2.1 空撮ドローンによる観測

本研究のドローンには、DJI 社製の P4 Multispectral(図 2.1)を使用した。基本スペックは、離陸重量が1487g、対角寸法が350mm、最大飛行時間が約27分、運用限界高度は6000m、送信機の最大伝送距離は約7kmである。しかし、航空法により高度150m以上の飛行は禁止されており、加えて目視外飛行の禁止が定められているため、観測は法令を遵守した高度150m以内かつ目視可能な範囲で観測を行った。また、ドローン上部に日照センサーが搭載されている。このセンサーは太陽放射照度を捉えることができる。このデータを後処理データと組み合わせることで、一日の異なる時間帯での太陽光の強さの違いに左右されることなく観測を行うことができた。搭載されているカメラはRGBカメラ1台と波長帯の異なる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)であった。それぞれのマルチスペクトルイメージングの帯域は、青色波長が $450\text{nm} \pm 16\text{nm}$ 、緑色波長が $560\text{nm} \pm 16\text{nm}$ 、赤色波長が $650\text{nm} \pm 16\text{nm}$ 、レッドエッジ波長が $730\text{nm} \pm 16\text{nm}$ 、近赤外線が $840\text{nm} \pm 26\text{nm}$ であった。すべてのカメラレンズの焦点距離は5.74 mmで、35 mm相当の焦点距離は40 mmであった(DJI 社 HP、P4 Multispectral のスペック表)。

ドローン操縦時には、送信機にiPadを接続しDJI社製の操縦用アプリケーションソフトDJI GO4を使用した。このアプリでは、機体の各ステータスの確認や撮影モードの変更が行える。また、画面上に搭載カメラによる映像が常時表示させることができ、常に海の状態を確認しながら観測を行うことができる。

実海洋の観測の際には、ドローンをボートから離陸させ上空からフロントの場所を特定し観測を開始した。カメラの向きを真下90度にし、高度150mから撮影を行っており、解像度は10cm/pixel程度である。2s毎の連続撮影を行い、可視画像と5つの波長帯のマルチスペクトル画像を保存する。

2.2 マルチスペクトル画像の解析方法

2.2.1 DJI 社により公表されている解析方法

マルチスペクトルカメラで観測した際、マルチスペクトル画像には誤差(口径食・露光時間・日照の強さ・ゲイン)が含まれている。そのため解析する際にそれらの誤差を校正する必要がある。そこでDJI社が公開している画像解析マニュアルであるDJI Image Processing Guideに示されているNormalized Difference Vegetation Index(NDVI; 植生正規化指数)を求める際のカメラ値の校正方法を参考に、本研究でも同様の校正を行って解析を進める。NDVIとは主に農業で使われる植生指標であり、植物の光の反射の特徴を生かし簡易的な計算式で植生の状況を把握するためのものである。

NDVIは校正後の近赤外線値と校正後の赤色波長値の差を両者の和で割ることで表したものである。

$$NDVI = \frac{NIR_{ref} - Red_{ref}}{NIR_{ref} + Red_{ref}} \quad (Eq.1)$$

ここで NIR_{ref}, Red_{ref} は NIR(近赤外線値)の反射率と RED(赤色波長値)の反射率を表す。
 NIR_{ref} は NIR(近赤外線値)の反射光を入射光で割ることで表すことができ、 Red_{ref} は
RED(赤色波長値)の反射光を入射光で割ることで表すことができる。それぞれ以下の式で
表される。

$$NIR_{ref} = \frac{NIR_{reflected}}{NIR_{incident}}, Red_{ref} = \frac{Red_{reflected}}{Red_{incident}} \quad (Eq.2)$$

ここで $NIR_{reflected}$ は NIR(近赤外線値)の反射光、 $Red_{reflected}$ は RED(赤色波長値)の反射光、
 $NIR_{incident}$ は NIR(近赤外線値)の入射光、 $Red_{incident}$ は RED(赤色波長値)の入射光を表す。
また、上式は日照の強さに関する変換係数を用いることで以下の式で表すことができる。

$$NIR_{ref} = \frac{NIR_{reflected}}{NIR_{incident}} = \frac{NIR_{camera}}{NIR_{LS}} \times \rho_{NIR} \quad (Eq.3)$$

$$Red_{ref} = \frac{Red_{reflected}}{Red_{incident}} = \frac{Red_{camera}}{Red_{LS}} \times \rho_{Red} \quad (Eq.4)$$

ここで NIR_{camera} は校正後の画像の値、 NIR_{LS} は日照センサーの値である。 ρ_{NIR} は日照の強さ
に関する変換係数であり、日照の強さによる値の変動を校正している。

$$\rho_x = \rho_{NIR} \times \frac{pCam_x}{pLS_x} \quad (Eq.5)$$

ここで $pCam_x$ はメタデータ内の Sensor Gain Adjustment の値である。また、 pLS_x は明るさ
に関するパラメータである。これにより、 ρ_{RED} を ρ_{NIR} を用いて表すことができ、変換係数を
 ρ_{NIR} に統一できるため値の校正が求めやすくなる。Eq.5 より Eq.3 と Eq.4 は、それぞれ以
下の式で表すことができ、

$$NIR_{ref} = \frac{NIR_{reflected}}{NIR_{incident}} = \frac{NIR_{camera}}{NIR_{LS}} \times \rho_{NIR} \times \frac{pCam_{NIR}}{pLS_{NIR}} = \frac{NIR_{camera} \times pCam_{NIR}}{NIR_{LS} \times pLS_{NIR}} \times \rho_{NIR} \quad (Eq.6)$$

$$Red_{ref} = \frac{Red_{reflected}}{Red_{incident}} = \frac{Red_{camera}}{Red_{LS}} \times \rho_{NIR} \times \frac{pCam_{Red}}{pLS_{Red}} = \frac{Red_{camera} \times pCam_{Red}}{Red_{LS} \times pLS_{Red}} \times \rho_{NIR} \quad (Eq.7)$$

Eq.6 と Eq.7、そして Eq.1 を用いることで、NDVI は以下の式で表すことができる。

$$NDVI = \frac{NIR_{ref} - Red_{ref}}{NIR_{ref} + Red_{ref}} = \frac{\left(\frac{NIR_{camera} \times pLS_{NIR}}{NIR_{LS} \times pLS_{NIR}} - \frac{Red_{camera} \times pLS_{Red}}{Red_{LS} \times pLS_{Red}} \right)}{\left(\frac{NIR_{camera} \times pLS_{NIR}}{NIR_{LS} \times pLS_{NIR}} + \frac{Red_{camera} \times pLS_{Red}}{Red_{LS} \times pLS_{Red}} \right)} \quad (Eq.8)$$

ここで $NIR_{LS} \times pLS_{NIR}$ はメタデータ内の Irradiance の値である。

$NIR_{camera}, Red_{camera}$ は校正後のカメラ値であり、 NIR_{camera} の校正は以下の式を用いる。

$$NIR_{camera} = \frac{(I_{NIR} - I_{BlackLevel}) \times Correction}{\left(NIR_{gain} \times \frac{NIR_{etime}}{1e6} \right)} \quad (Eq.9)$$

I_{NIR} はマルチスペクトル画像の値、 $I_{BlackLevel}$ はブラックレベル値でありメタデータ内の BlackLevel、 NIR_{etime} は露光時間でありメタデータ内の ExposureTime、 NIR_{gain} はゲインでありメタデータ内の Sencergain で与えられる。Correction 内では口径食の除去の校正を行っている。Correction 内の計算は以下の式を用いる。

$$I_{(x,y)} \times (k[5] \cdot r^6 + k[4] \cdot r^5 + \dots + k[0] \cdot 1.0) \quad (Eq.10)$$

$$r = \sqrt{(x - CenterX)^2 + (y - CenterY)^2} \quad (Eq.11)$$

$I_{(x,y)}$ はブラックレベル補正後のカメラ値である。 $k[1] \sim k[5]$ はレンズの湾曲による固有の値であり、メタデータ内の Vignetting Data の値である。 r は口径食の中心から各ピクセルまでの距離である。 $CenterX, CenterY$ は口径食の中心位置であり、やはりメタデータで与えられる。同様の方法で Red_{camera} の値も求めることができ、Eq.9~11 で求めた NIR_{camera} を Eq.8 に代入すれば NDVI の値を求めることができる。

以上の手順を用いることで $Blue_{camera}$ と $Green_{camera}$ の値を求め、B/G を以下の式から求めることができる。

$$Blue_{camera} = \frac{(I_{Blue} - I_{BlackLevel}) \times Correction}{\left(Blue_{gain} \times \frac{Blue_{etime}}{1e6} \right)} \quad (Eq.12)$$

$$Green_{camera} = \frac{(I_{Green} - I_{BlackLevel}) \times Correction}{\left(Green_{gain} \times \frac{Green_{etime}}{1e6} \right)} \quad (Eq.13)$$

$$B/G = \frac{Blue_{ref} - Green_{ref}}{Blue_{ref} + Green_{ref}} = \frac{\left(\frac{Blue_{camera} \times pLS_{Blue}}{Blue_{LS} \times pLS_{Blue}} - \frac{Green_{camera} \times pLS_{Green}}{Green_{LS} \times pLS_{Green}} \right)}{\left(\frac{Blue_{camera} \times pLS_{Blue}}{Blue_{LS} \times pLS_{Blue}} + \frac{Green_{camera} \times pLS_{Green}}{Green_{LS} \times pLS_{Green}} \right)} \quad (Eq.11)$$

以上の過程で、各波長ごとの画像に関して露光時間、ゲイン値、口径食の校正することができる。また、割り算をする過程で太陽光による放射照度の校正をすることができる。クロロフィルの指標の1つとして青色波長と緑色波長の2つのデータを用いた B/G を見積もることができるため、海色の特徴をとらえやすくすることが可能になった (Goddijn and White(2005))。

2.2.2 これまでの画像解析と今回の画像解析の比較

これまでの先行研究で行われてきた画像解析方法と今回行った画像解析方法で何が改善されたのか説明する。撮影した画像には口径食・照り返し・露光時間・日照の強さ・ゲインなど様々な誤差が生じるが、その中でも口径食が最も大きく影響する。口径食とはカメラのレンズの湾曲により生じる楕円状の誤画像であり、画像内に現れる際には明らかに口径食であることが分かることが多い。口径食が表れると画像にマスクがかかってしまうため、海面の情報を正確に観測することが難しくなる。そのため、これまでの画像解析(例えば森永, 2018)では口径食の除去のみに焦点をあてて行っていた。

これまでの口径食の除去は、口径食が楕円状の誤差であることを利用して二次曲線近似による疑似的な楕円近似法によって口径食成分を推測し除去するという方法であった(Miyao and Isobe, 2017)。この手順をある河川フロントを撮影したマルチスペクトル画像(図 2.2.1)を例に詳しく説明する。まず、何も手を加えていない画像には楕円状の口径食成分が強く表れていることがわかる。この画像には口径食のほかに、右上に太陽の照り返しによる高い値が表れている。この画像から横一列の値を取り出し二次曲線近似(図 2.2.2)を行うことで口径食を予測することができる(図 2.2.3)。画像の大きさは 1600×400 pixel であるので縦 400 列すべてに対してこの近似を行い、この予測値を元の値から引くことで口径食を除去する(図 2.2.4)。この手法により大方の楕円状のエラーが除去できる。

しかし、この除去方法には問題が複数ある。一つは、場所によって値を除去しすぎてしまうことである。画像の右下の部分に線状の不自然に値の低い部分が存在する。これは、海面以外に堤防など沿岸の構造物やボートなどが写りこんでいる場合、海色と明らかに値が大きくかけ離れているため二次曲線近似による口径食の予測値に強く影響を与え、実際の口径食成分より値を大きく引いてしまうために生じる誤差である。また、もう一つの問題として、正確性が保証されていないことである。口径食成分のみを試みる手法であるものの、太陽の照り返しによる極端に高い値も軽減されており、口径食以外の値も除去されてしまう。同様に意図していない値を除去している可能性がある。つまり大きな海色の差や泡による線構造は残っているが微小な海色の差を除去してしまう恐れがある。そのため、空間構造の小さな構造を解析がしたい場合には、この方法は適さないと考えられる。

そこで本研究では DJI 社の NDVI 算出方法を参照した口径食除去を行うことにした。2.1.1 節の式 Eq.10,11 でレンズ固有の情報から口径食成分を確実に補正できることがわかる。実際にこの式により口径食を補正した(図 2.2.4)ところ口径食が除去されるとともに、微細な空間規模構造も検出されており、また、不自然な値の上下は見当たらなかった。口径食の除去に関して大幅に改善されたといえる。また、この方法では口径食のみでなく、露光時間・日照の強さ・ゲインなど様々な誤差を一括で校正することが可能であり、これにより高精度で解析できるようになると考えられる。

2.2.3 マルチスペクトル画像の有用性

これまでの観測では可視カメラのみで観測が行われていたが、本研究ではマルチスペクトルカメラを使用して観測を行った。色の強さを可視画像は赤/青/緑の3種類を組み合わせた各255段階で表すのに対して、本研究で利用したマルチスペクトル画像は赤/青/緑/レッドエッジ/近赤外線の種類で各1000段階程度で表現されており、可視画像の約4倍の解像度を持っている。マルチスペクトル画像の解像度の大きさが実際の解析においてどのように影響するのか検証を行う。

解析する際にどのような差があるのか実際に可視画像とマルチスペクトル画像の両方でB/Gの計算を行った結果を比較してみる。可視画像では、河川フロントによる泡列が見えない(図2.2.5)。また、泡による値の上下などの細かい構造を捉えられていないことから解像度が低いことが分かる。一方、マルチスペクトル画像では、河川フロントによる泡列がはっきり確認できる(図2.2.6)。また、波による値の上下も捉えられており解像度が高いことが分かる。以上からマルチスペクトル画像の方が海表面の解析に向いており、河川フロント観測に適していることが分かる。

2.3 水塊データのセンサーと搭載したボートによる観測

本研究では、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2.3.1)を利用した。水上ドローンは、メインボートと左右のフロートから構成されている。左右のフロートには推進プロペラが搭載されており、専用の送信機で操作する。舵のような機構は無く、左右のプロペラの前後操作のみで方向転換を行う。また、メインボートには曳航用のロープ取り付け具がついており他のボートにより曳航することもできる。水上ドローンにはAcoustic Doppler Current Profiler(ADCP)を取り付けることも可能であり水底地形、流速、位置情報を取得可能である。

海中観測のために利用した観測機器は、JFEアドバンテック社製の塩分・水温計、濁度式クロロフィル計、深度計である。水温計は温度によって電気抵抗が変化する材料(サーミスタ)の電気抵抗値を測定することで温度変化を測定している。サーミスタの反応速度は一般に1s以下でありタイムラグが少ないため正確に測定することができる。塩分計は海中の電気伝導度を計測することで塩分に換算する。濁度式クロロフィル計は、能動的クロロフィル蛍光センサーを用いたものであり、植物プランクトンに光を強制照射し、それに応答して放出されるクロロフィル蛍光を測定する。これらの観測機器は観測時間や測定間隔をあらかじめ設定しておく。本研究では1s間隔で測定を行った。

観測の際には、水上ドローンや曳航用のロープにつなげた浮きに観測機器を取り付けたロープを垂下させる。観測機器を取り付けるロープの長さは水深や河川水層の大きさに合わせて長さを随時調整し、複数の観測機器を深度毎に取り付けることが可能である。河川フロント間を横断させ連続観測することで水塊データの空間変化を観測する。また、空撮ドローンでの空撮画像に連続観測線が映り込むようにし、画像上のどの地点の水塊データかお

およそ推測できるようにする。

2.4 大槌湾での観測

2020 年 4 月 19 日と 20 日に岩手県大槌町(図 2.4.1)にて観測を実施した。本観測は空撮ドローンと水上ドローンを組み合わせた初めての観測である。大槌湾には、大槌川、小槌川、鵜住居川の 3 つの川が流入している。また、湾口の距離が約二キロであることから、空撮ドローンの航行距離圏内に十分余裕があり、ドローンを使用した観測に適している。大槌湾には、東京大学大気海洋研究所の実験施設が設置され、これまでに蓄積された湾内データと経験をもとに事前に河川フロントの形成域を推測し、効率よく観測を進めることが可能であった。

大槌湾の観測では、ドローンを用いて上空から河川フロントを撮影しつつ、観測機器を取り付けた水上ドローンを遠隔で操縦し河川フロント間を横断させる(図 2.4.2)。空撮画像に水上ドローンが写るように撮影することで、撮影した河川フロントの位置と水上ドローンで観測した水塊データの位置を同期させた。同湾での既往の観測では河川水の層厚が 1.0 m 程度であったことから河川フロントの断面構造を観測するために水上ドローンには全長 1.5m 程度のロープを垂下させ、これに 0.5m おきに観測機器を取り付けた。塩分・水温は 0、0.5、1.0、1.5 m 深で計測し、クロロフィル濃度は 0、1.5 m 深で計測した。また、1.5 m 部分に深度計を取り付けており、この深度計が 1.5m 以下を示すとロープが傾斜していると判断した。

2.5 厚岸湾での観測

2020 年 10 月 4 日と 5 日に北海道厚岸町の厚岸湖及び厚岸湾(図 2.5.1)にて観測を実施した。厚岸湖には別寒辺牛川から河川水が流入し、その後、厚岸湖から厚岸湾に流出している。別寒辺牛川と厚岸湖、厚岸湖と厚岸湾の水塊特性の異なる海域において、異水塊の境界部(フロント)の観測を試みた。また、別寒辺牛川は湿原河川であることから、海水と明確に海色が違い河川フロントの観測が容易であるという特徴があることが期待された。

大槌湾での観測の際に水上ドローンの推進力が潮流に対して不足していた経験を踏まえ、また同湾ではアマモなどの浮遊物が多数ありスクルーの絡まる危険があったことから、厚岸湾では水上ドローンを独立して操作するのではなく、小型のボートからロープを引くことで横断観測した。この時曳航するボートは河川水の層を乱さないように 1 ノット程度で航行させた。また、ボートを停止させロープを手で引くことでも観測した。空撮ドローンを用いて上空から河川フロントを撮影しつつ、観測機器を取り付けた水上ドローンをボートで曳航し河川フロント間を横断させる(図 2.5.2)。空撮画像に水上ドローンが写るように撮影することで、撮影した河川フロントの位置と水上ドローンで観測した水塊データの位置を同期させた。厚岸湾の水深は 1.5m であることから、河川フロントの水中断面を観測するため、水上ドローンには全長 1.2m 程度のロープをボートから垂下させ、これに観測機器

を取り付けた。塩分・水温・クロロフィルは 0.3、0.6、0.9、1.2 m 深で計測した。また河口付近の観測では水深が 0.5m 程度であるので 0.3m の一点のみでの観測を行った。また、1.2 m 部分に深度計を取り付け、深度を記録することで測定深度の正確性を確認し、この深度計が 1.2m 以下を示すとロープが傾斜したと判断した。



図 2.1 空撮ドローン(P4 Multispectral)。可視カメラ 1 台とマルチスペクトルカメラ 5 台が搭載されている。

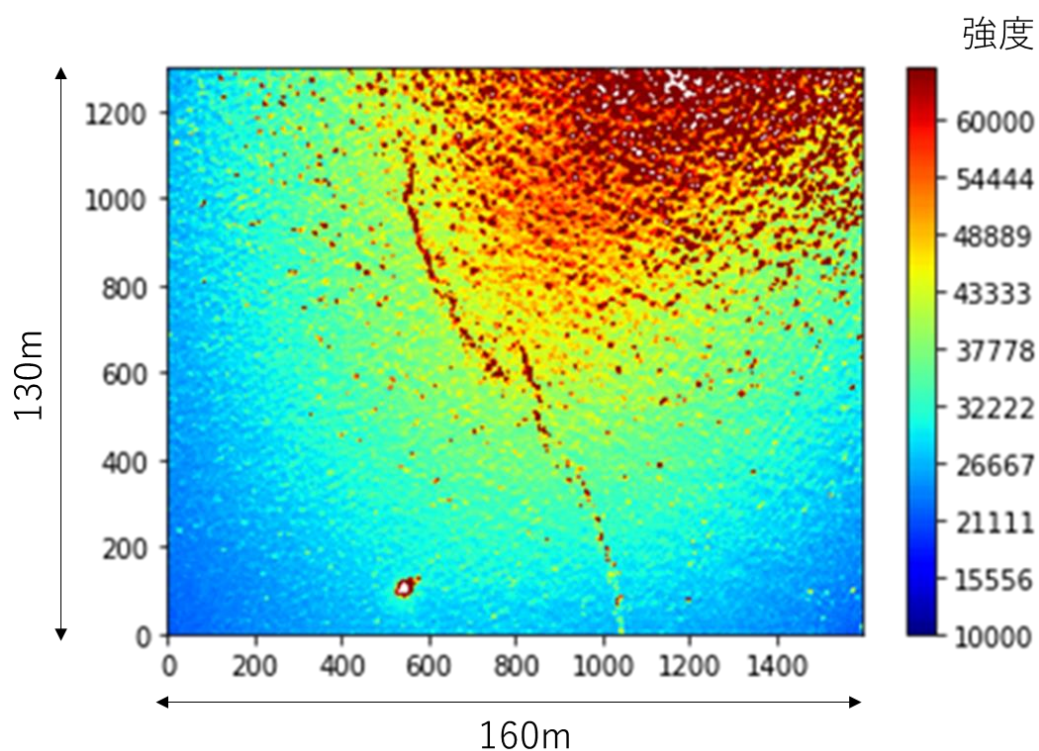


図 2.2.1 口径食の表れたマルチスペクトル画像の例。

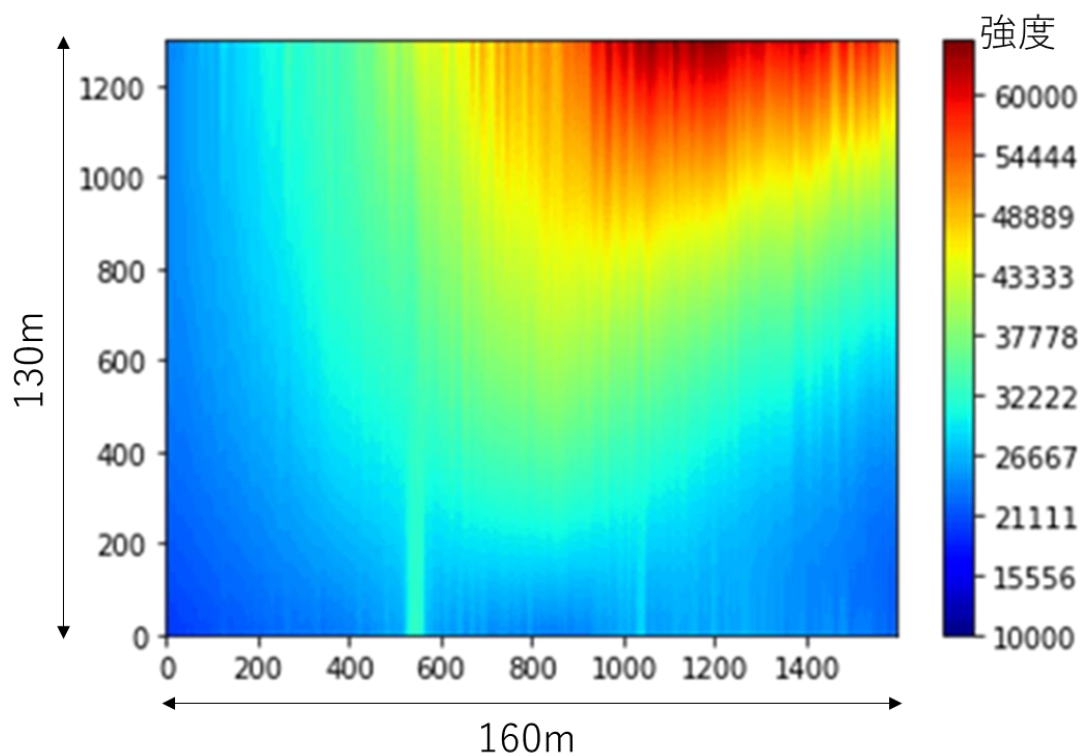


図 2.2.2 二次曲線近似によって推測した図 2.2.1 の口径食成分。

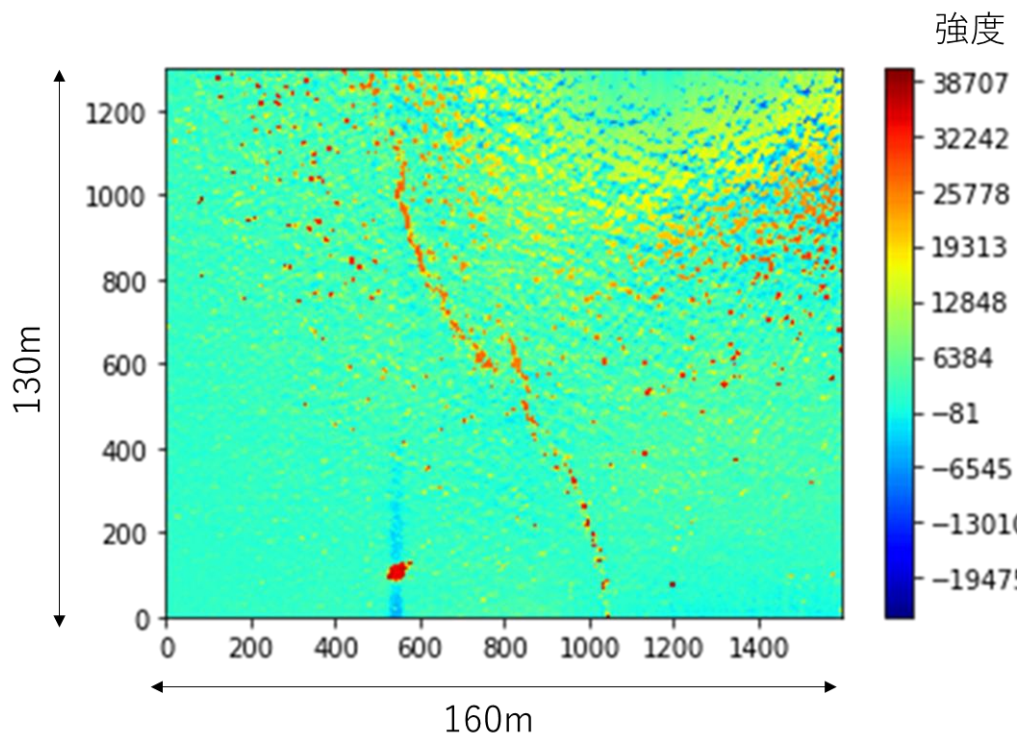


図 2.2.3 元の画像(図 2.2.1)から口径食成分(図 2.2.2)を除去した画像。楕円状の口径食は除去できているように見える。

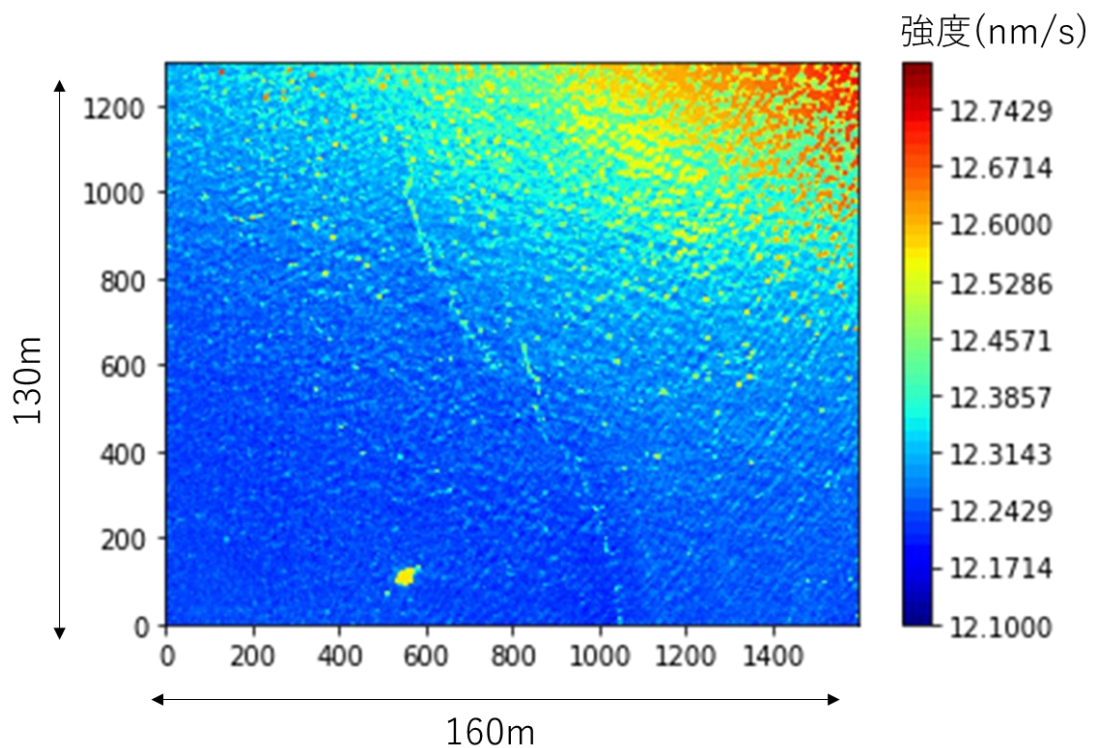


図 2.2.4 DJI 社のマニュアルを参考にした手法(2.2.1 節)で口径食を除去した画像。図 2.2.3 と違い海面波の様子も観察でき口径食を正確に除去できていることがわかる。

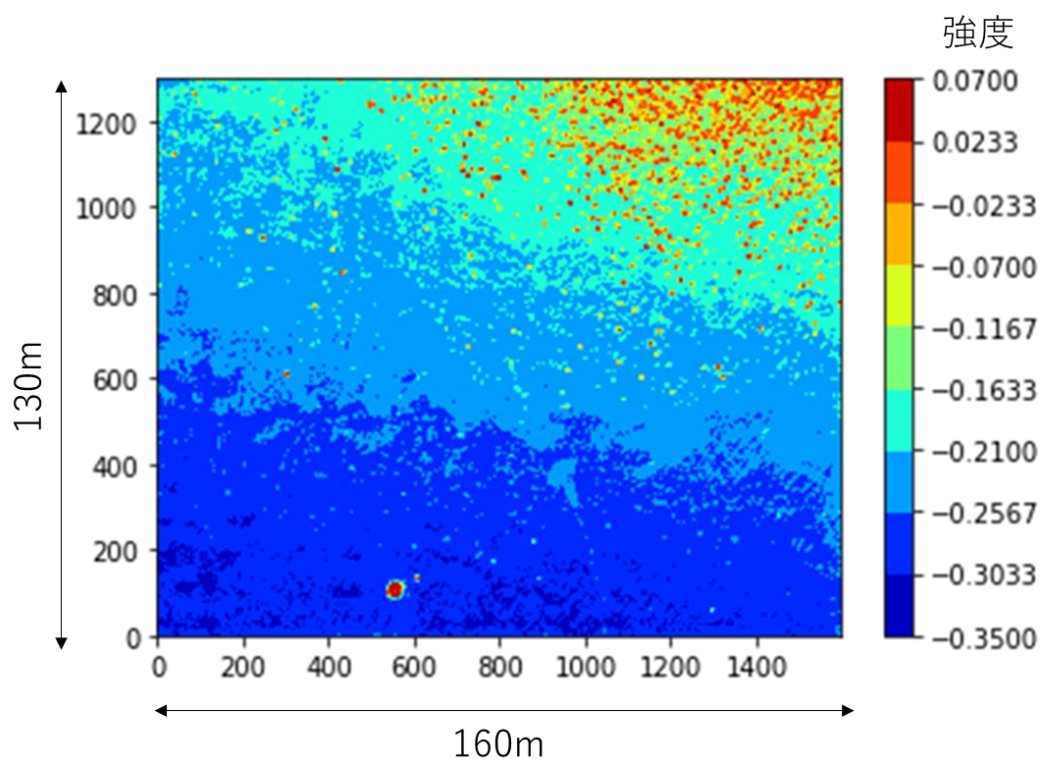


図 2.2.5 図 2.2.1 と同時に撮影した可視画像で求めた B/G。

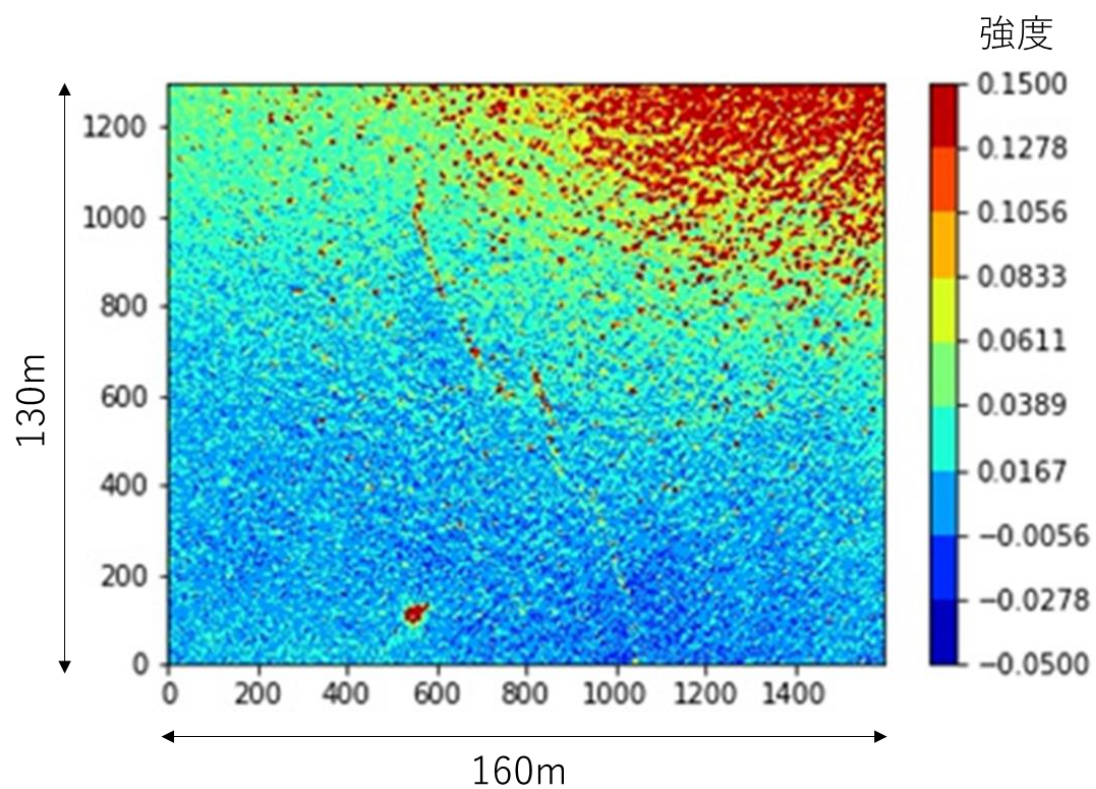


図 2.2.6 図 2.2.1 と同時に撮影した青波長と緑波長のマルチスペクトル画像を用いて求めた B/G。図 2.2.5 と比較して解像度が高いことがわかる。



図 2.3.1 水上ドローン(ウルトラハイスピードボート)

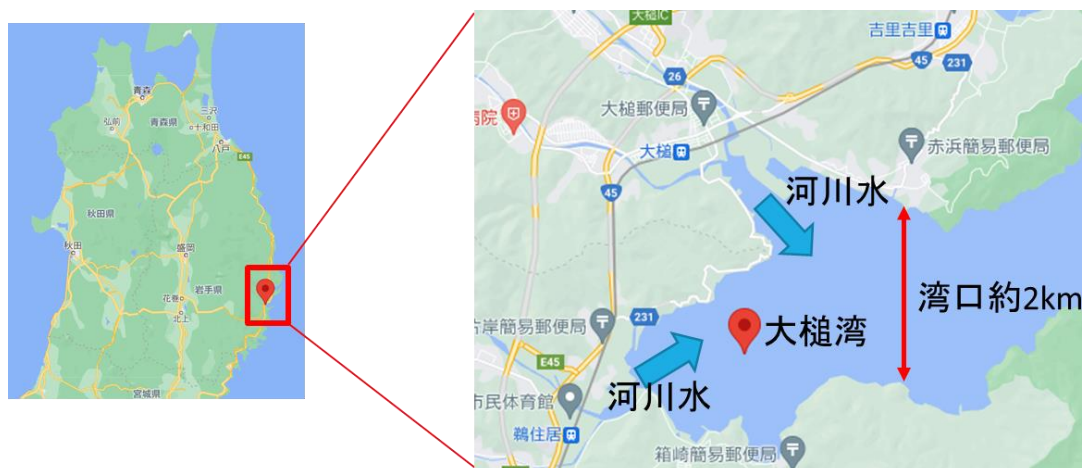


図 2.4.1 右が大槌湾の位置。左が大槌湾の様子。上側から大槌川と小槌川が流入し、左から鶴住居川が流入している。(地図は Google Maps(<https://www.google.co.jp/maps/>)より)

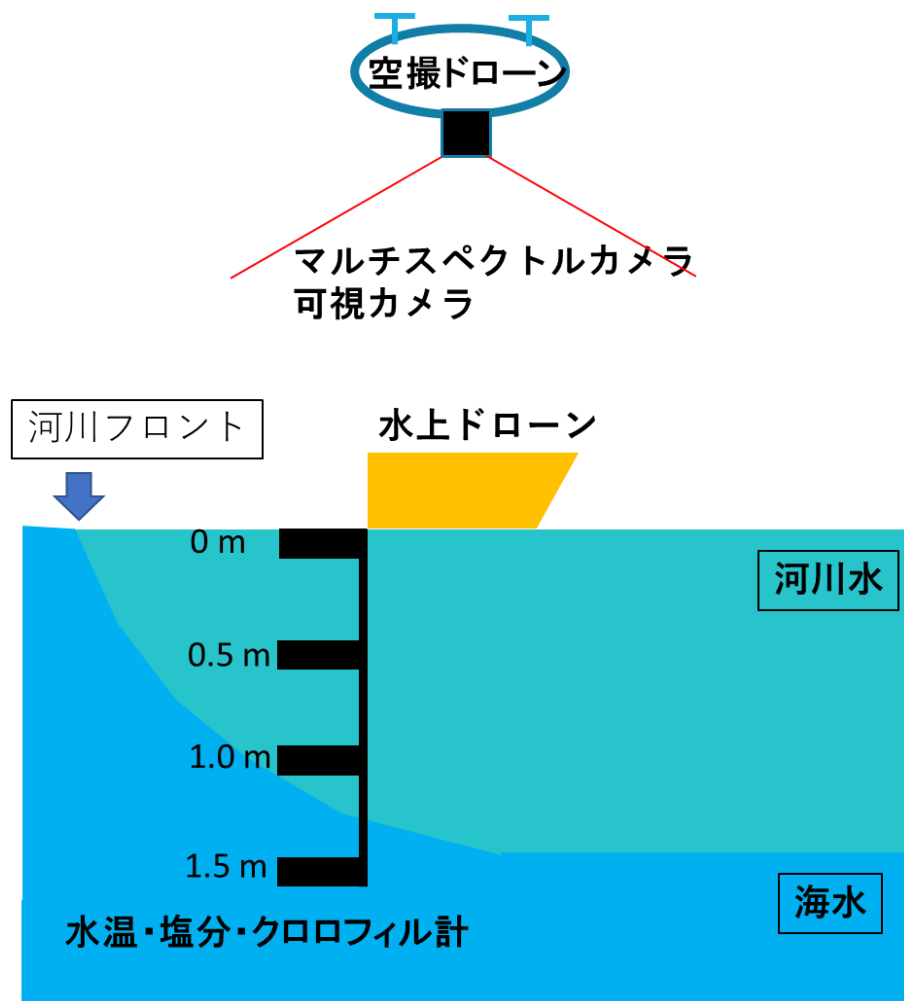


図 2.4.2 大槌湾での観測イメージ図。空撮ドローンで河川フロント撮影しつつ水上ドローンで水塊データを測定する。

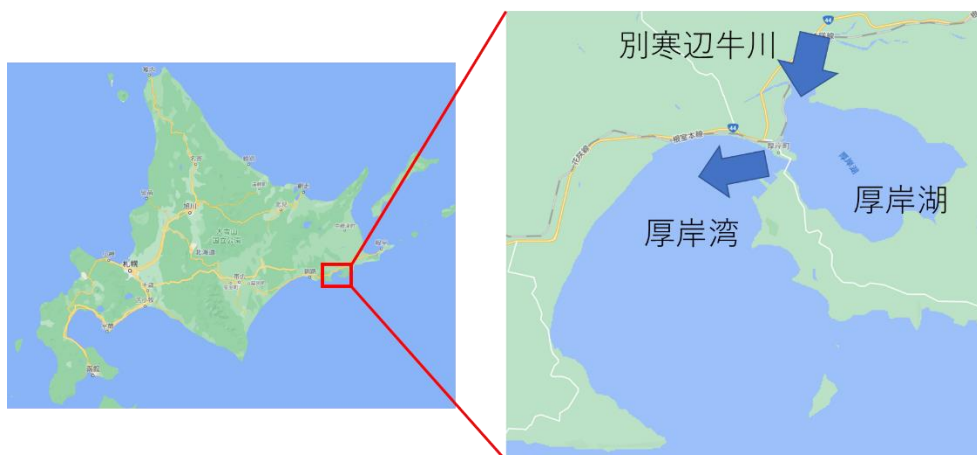


図 2.5.1 左が厚岸湾の位置、右が厚岸湾の様子。別寒辺牛川が厚岸湖に流入し、厚岸湖から厚岸湾に流入している。(地図は Google Maps(<https://www.google.co.jp/maps/>)より)

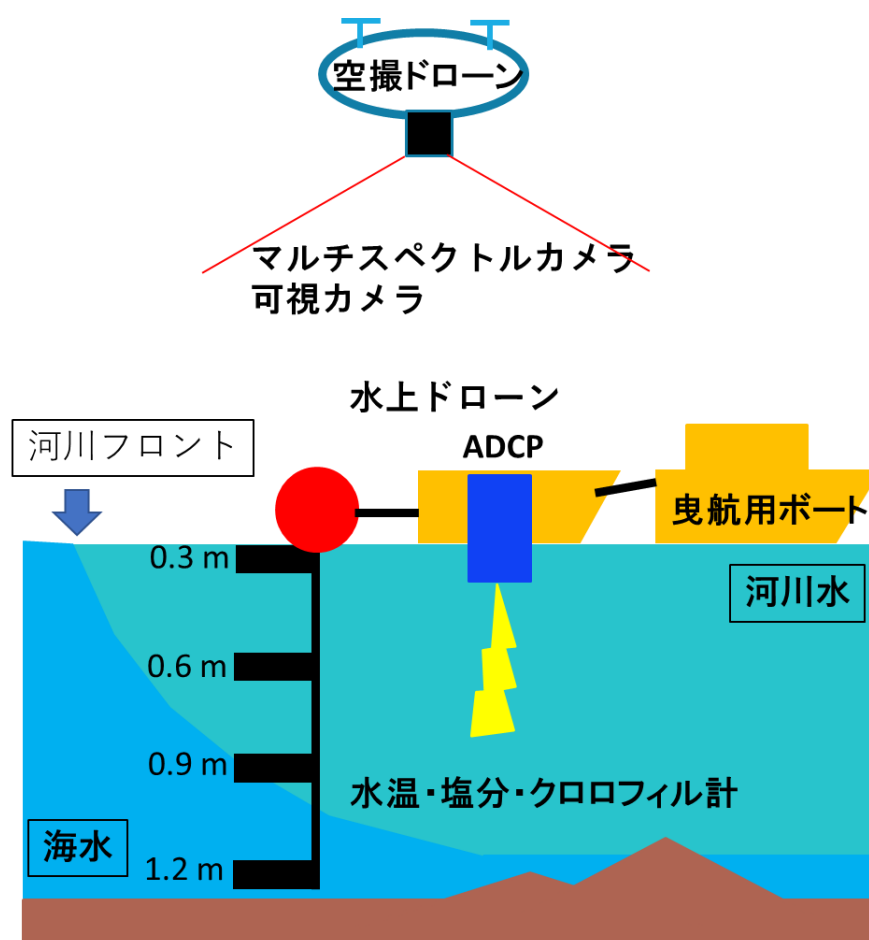


図 2.5.2 厚岸湾での観測イメージ図。空撮ドローンで河川フロント撮影しつつボートで曳航した水上ドローンで水塊データを測定する。

第3章 大槌湾の観測データの解析結果

3.1 大槌湾での観測

3.1.1 観測の実施

4月19日は強風により観測は中止となったが、翌20日はやや強い風が吹いていたものの観測可能な程度であり、予定していた内容を実施することができた。観測に先立って、まず空撮ドローンで上空より河川フロントを目視観測したが、海色変化や浮遊物から河川フロントを見つけることはできなかった。これは、大槌付近では晴天が続いて河川流量が少なかったことや、風が強く風波による混合によって海面の河川水の混合が促進され河川フロントが乱されていたことによると考えられる。空撮ドローンによる観測により河川フロントを見つけることはできなかったが、乗船していた小型ボートから目視で河川フロントらしき線を鵜住居川付近(図3.1.1、図3.1.2)に発見し、この付近の観測を行うことにした。目視での確認に限られたためフロントの正確な位置は不明瞭であったが、河川フロントのおおよその位置を船上から予測し、観測を行った。

3.1.2 空撮ドローンによる観測

可視画像(図3.1.3、図3.1.4)では河川フロントの形状や先鋭度といった特徴は確認できなかった。取得された画像の左下にある物体が、本研究で使用した水塊データを測定中の水上ドローンであり、この水上ドローン周辺から図の上下方向に、不明瞭ながらも河川フロントらしき海色変化が認められる。また、画像右下に太陽の照り返しが写っており白くなっている。

同時刻のマルチスペクトル画像青色波長(図3.1.5)では、やはり不明瞭ながらも海色変化が認められ、水上ドローン周辺から図の上下方向に伸びる河川フロントがあることが分かる。海色に差があることを確認するために、図3.1.6に点線で囲っている河川側と海側で、各 200×600 pixel の面積に関して青色波長値の平均値を求めた。その結果、河川側では 12.422 nm/s 、海側では 12.446 nm/s であった。わずかな差であるが確かに海色に差があり、河川フロントが存在することが確かめられた。画面左上に見える物体は可視画像にも写っていた水上ドローンである。また、右下の赤い部分は太陽の照り返しである。また、画面全体で海面の波による値の上下が確認できる。マルチスペクトル画像緑色波長(図3.1.7)でも、青色波長と同様に泡列による線構造とわずかな海色の差があり、図3.1.8に点線で囲っている河川側、海側の各 200×600 pixel の面積に関して青色波長値の平均値を求めたところ河川側では 12.665 nm/s 、海側では 12.691 nm/s であった。わずかな差であるが海色に差があることが確かめられた。マルチスペクトル画像の青色波長(図3.1.5)と緑色波長(図3.1.7)の値を用いて、海色の差が見やすくなることを期待して求めた B/G (図3.1.9)では全体的にノイズのようなものしか見えなかった。フロントを境に差があるかどうか、確かめるために図3.1.10に点線で囲っている河川側、海側の各 200×600 pixel の面積に関して値の平均値を

求めたところ、河川側では-0.247、海側では-0.249であった。これらに有意な差はなく、フロントの周辺にも期待していた海色の差は見えなかった。画像右下 1/4 程度の値が大きくなっているが、これは太陽光の反射によるものと考えられる。

3.1.3 水上ドローンによる観測

大槌湾で水上ドローンにより測定した深度毎の塩分、水温、クロロフィルデータを示しており、河川フロント前後周辺における水塊データの変化をみることができる。なお、垂下させたロープの傾斜を確かめるために最下端に取り付けた深度計による測定結果では、常に数センチ程度の差であり、各深度の水塊データ観測の結果に影響を与えるものではなく、正確に測定が行えたといえる。水塊データはプロット図とコンター図の 2 種類を作成しているが、どちらも同じデータを使用している。コンター図では、実際の海中の状態をイメージしやすく河川フロントを横断する方向の鉛直断面分布を表している。

塩分のプロット図(図 3.1.11)では、point400(以降、1pont は約 0.5m であることに留意)あたりで、0m に 0.5 程度の急激な塩分低下を確認できる。これは水上ドローンが河川フロントを海側から河川側に横断したためと考えられる。基本的に 1.5m での塩分が最も大きく、次いで 1.0m、0.5m、0m の順に塩分は低下しており、深度が深いほど塩分が高い成層が確認できた。point100 においては、0m、0.5m、1.0m の深度で値が近く、鉛直混合していることが分かる。塩分のコンター図(図 3.1.12)では、図の point400 よりも右手表層に塩分が低い部分があり、point400 周辺に河川フロントが存在すると考えられる。これより右手には、河川水層が 0.5m 程度の厚さで存在していることが分かる。水温のプロット図(図 3.1.13)では point400 あたりで、0m に 1°C 程度の急激な水温低下が見られ、やはり河川フロントの存在が確認できた。基本的に 0m での水温が最も高く、次いで 0.5m、1.0m、1.5m の順で水温低下がある成層構造が確認できた。また、河川フロント上ではないが point100 においても 0m に 1°C 程度の急激な水温低下が見られた。水温のコンター図(図 3.1.14)では、point 0 ~ 400 あたりの海水側表層に水温の突出して高い部分が見られる。クロロフィルのプロット図(図 3.1.15)では河川フロントを挟んで大きな変動は見られなかった。基本的に 0m の値より 1.5m での値が大きくなっており、深度が深くなるにつれクロロフィル濃度が高くなることが分かる。

3.2 大槌湾観測についての考察

大槌湾の観測では、空撮ドローンによる撮影と水上ドローンによる水塊データ直接観測を組み合わせるといった初の観測手法を試みた。その結果、河川フロントの空間分布と海中構造を同時に観測することに成功した。

空撮ドローンによる観測において、可視画像では河川フロントの指標である海色の差や泡列の存在を確認することができなかったが、マルチスペクトル画像では河川側と海側で波長値の平均を求めることで、フロントを挟んで波長値に有意な差があることが確認でき

た。しかし、その差は微小であり、空撮ドローンのみで明確な河川フロントの検出は困難であった。そこで、水上ドローンによる水塊データを解析することで、河川フロント位置に確証を得ることができた。このように直接観測を組み合わせることで、空撮のみでは見逃してしまう恐れのある弱い河川フロントであっても確実に観測することができた。

今後の観測にあたって想定される改良点は以下の通りである。水上ドローンで河川フロントの水塊構造を観測することによって、河川水と海水の混合過程を知ることができる。既往観測では大槌湾の河川水の層は1.0m程度であったことから、本観測では0m、0.5m、1.0m、1.5mの4点測定を行うことによって、河川水層の鉛直構造を観測できる期待があった。しかし、今回の観測では河川水の層が0.5m以下であったことから、0mの観測値のみにしか大きな値の変化が見られず、期待していた河川水層の鉛直構造を捉えることはできなかった。大槌町では連日晴れが続いていたことから河川水の流入が少なく河川水層が小さかったことが考えられる。今後は、水上ドローンによる観測の前に数点での Conductivity Temperature Depth(CTD)観測を行い、あらかじめ河川水層の厚さを調べたうえで、層厚さによって垂下させる観測機器の位置が可変可能な観測システムの作成が必要と考えられる。また、水上ドローンの課題として推進力不足があった。事前に実験水槽で動作確認した際は十分な推進力があるように思えたが、実海洋での動作では強い潮流に加え、表面波、機体を受ける風の影響で推進力と進行方向の制動性の不足により操作が難しく、狙ったポイントの観測を行うことが難しかった。推進性能を改善する必要があると考えられる。しかし、河川水層を乱してしまわない程度の推進力にとどめる必要もありそのバランスは難しいかもしれない。空撮画像の問題として、太陽の照り返しが写りこむことによって画像の一部分を活用することができなかった。現在の画像解析方法ではこのような照り返しを補正することはできないため、対策としては太陽の出ていない曇りの日に観測を行うことしかない。限られた観測日程に天気を合わせることは難しいことを考えると、照り返しによる誤差を除去する方法として、例えば、Miyao et al.,2014 のような手法を組み合わせる必要がある。



図 3.1.1 大槌湾撮影ポイント。丸印のあたりに形成された河川フロントの観測を行った。(地図は Google Maps(<https://www.google.co.jp/maps/>)より)

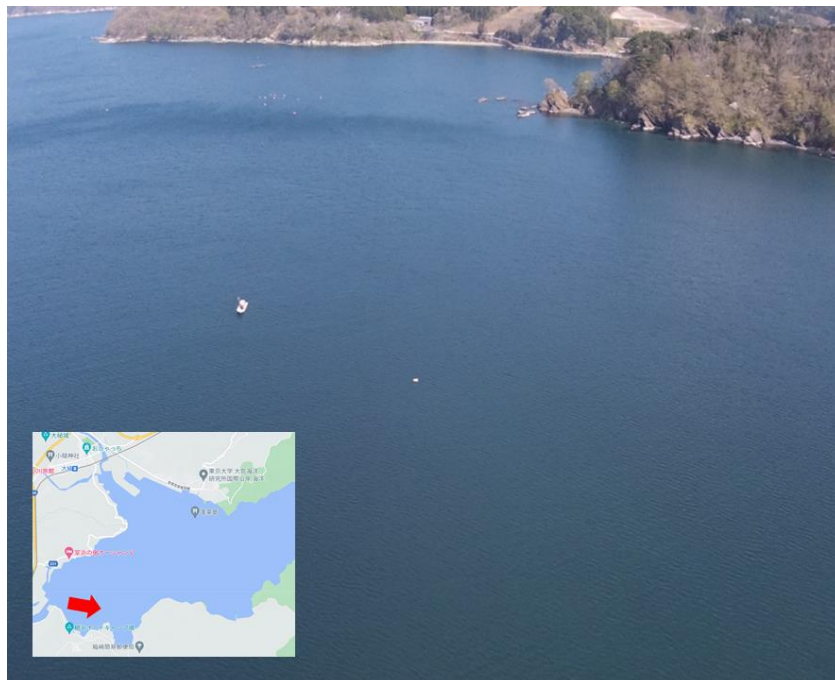


図 3.1.2 ドローンから撮影した河川フロント周辺の可視画像。目視で確認することは難しいが画像左上から右下方向に河川フロントが存在する。左下の図は撮影位置と撮影方向である。(地図は Google Maps(<https://www.google.co.jp/maps/>)より)

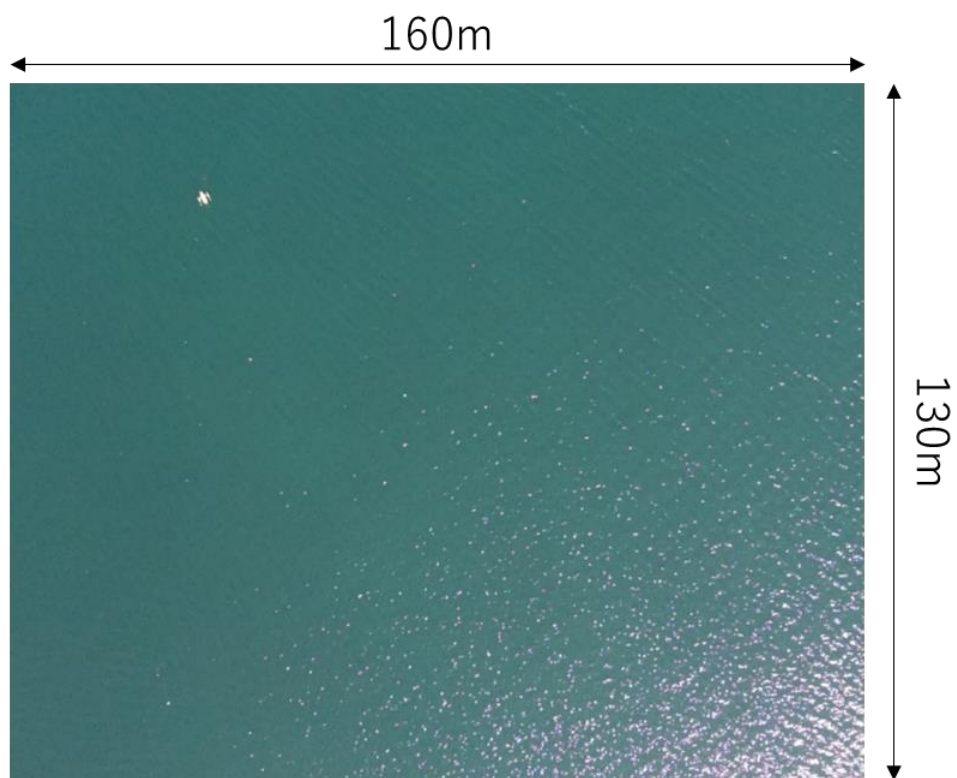


図 3.1.3 大槌湾で撮影した河川フロントの可視画像。左上に写っている白いものは水上使用した水上ドローンである。目視で確認することは難しいが、水上ドローンの位置に上から下に伸びる河川フロントが存在する。

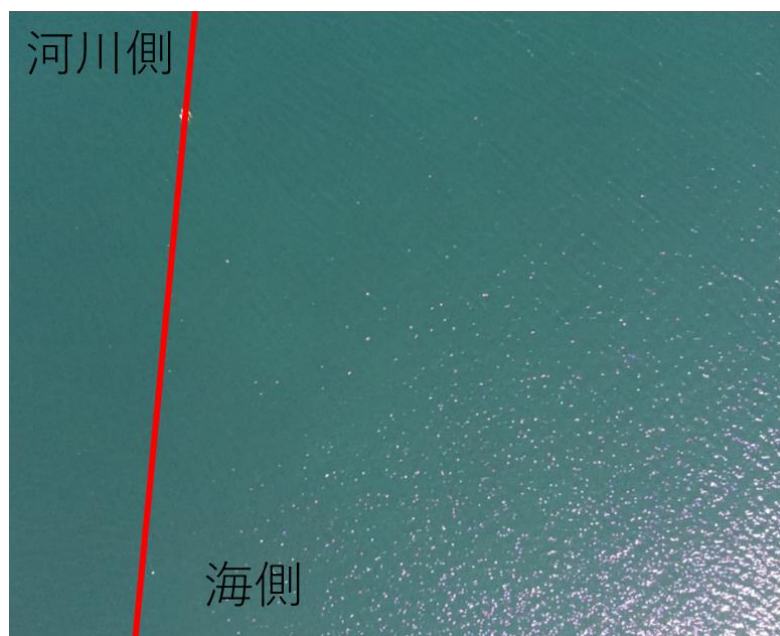


図 3.1.4 図 3.1.3 と同じ画像。赤線の位置に河川フロントが存在する。フロントの左側が河川、右側が海である。

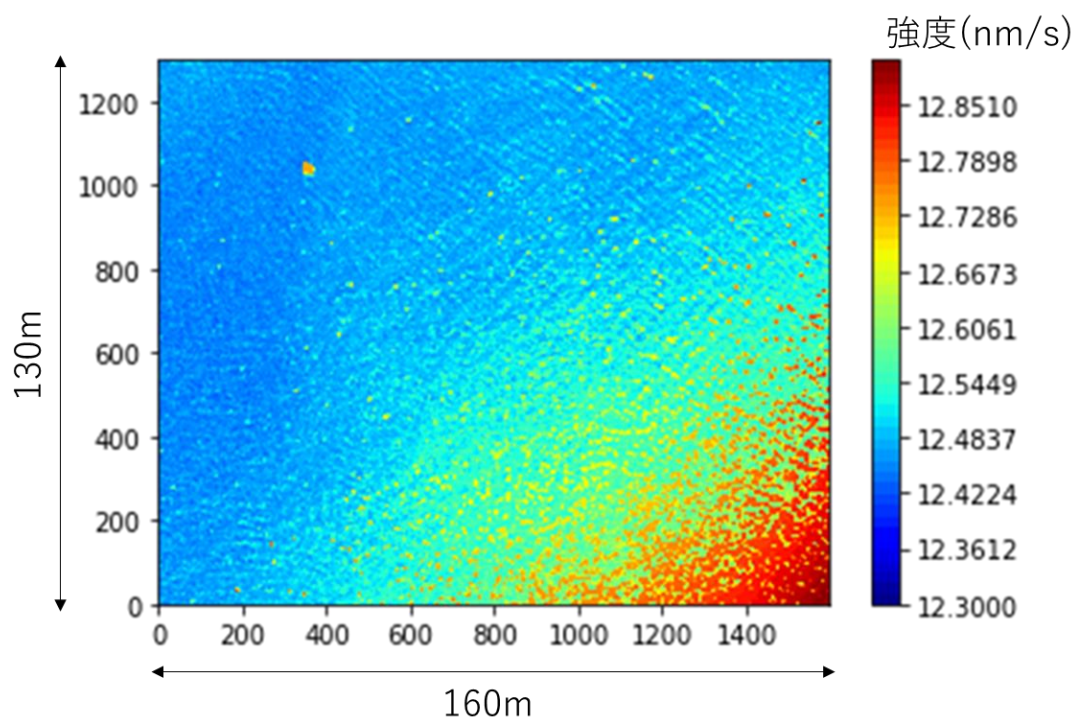


図 3.1.5 大槌湾で撮影した河川フロントのマルチスペクトル画像(青色波長)。水上ドローン(左上の白点) の位置に上から下に伸びる河川フロントが存在し、フロントを境に左右で若干の海色の差が確認できる。可視画像(図 3.1.3)と同時に撮影したものである。

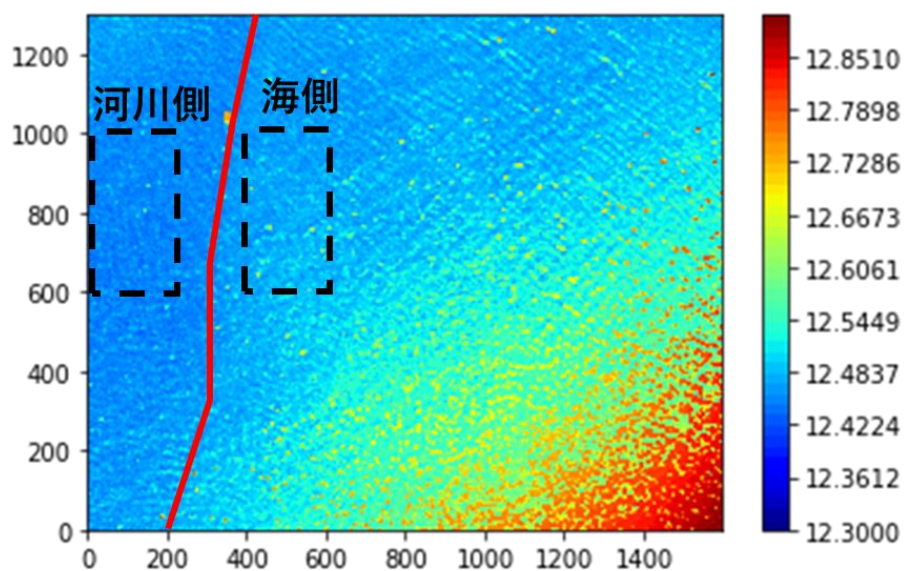


図 3.1.6 図 3.1.5 と同じ画像である。赤線は河川フロントの位置、点線四角は平均値を求めた範囲である。

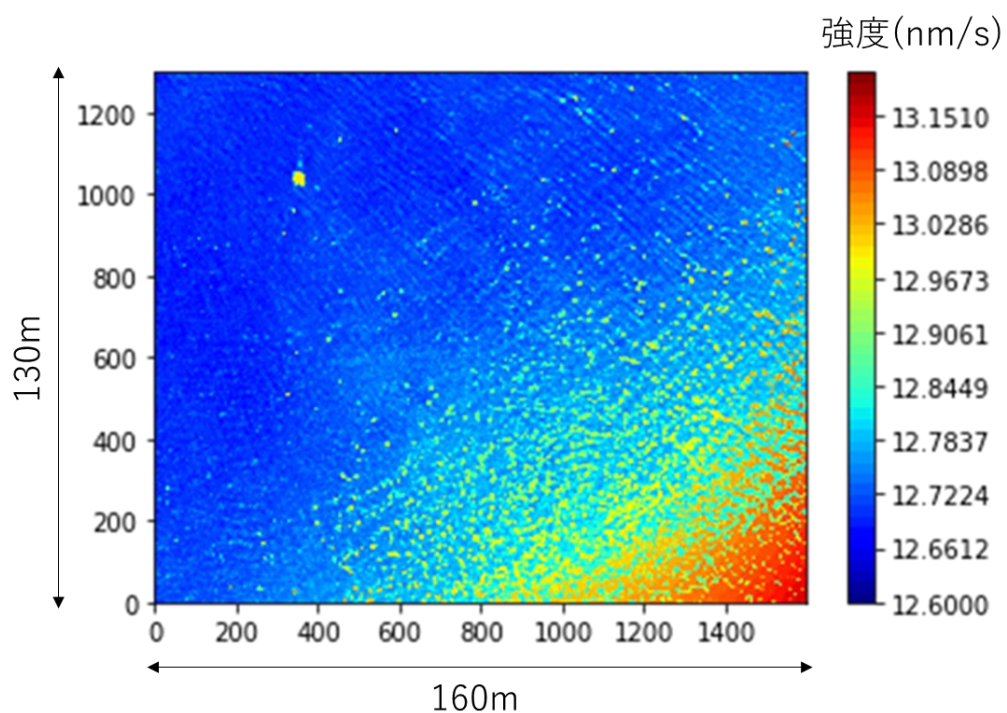


図 3.1.7 大槌湾で撮影した河川フロントのマルチスペクトル画像(緑色波長)。水上ドローン(左上の白点) の位置に上から下に伸びる河川フロントが白い線として見える。また、河川フロントの左右で若干の海色の差が確認できる。可視画像(図 3.1.3)と同時に撮影したものである。

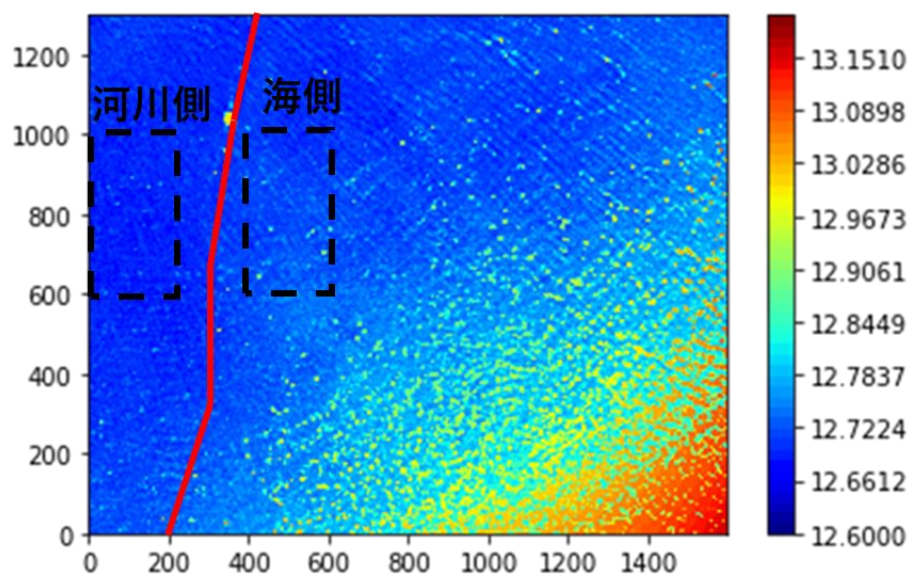


図 3.1.8 図 3.1.7 と同じ画像である。赤線は河川フロントの位置、点線四角は値の平均値を求めた範囲である。

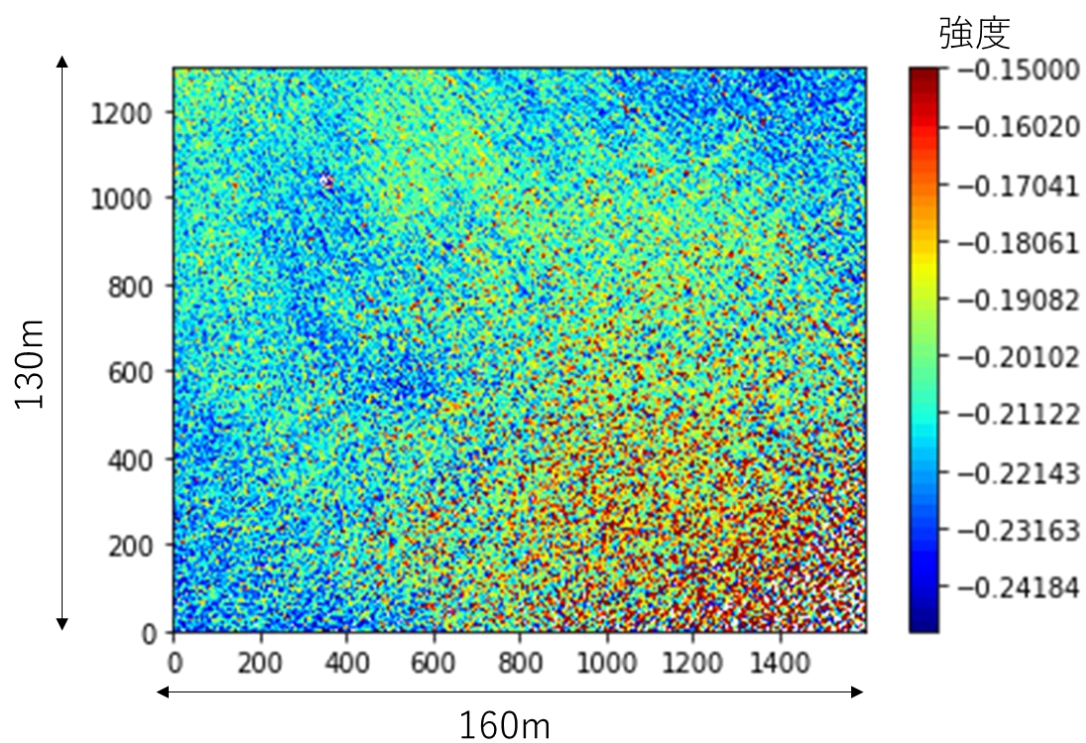


図 3.1.9 大槌の河川フロントで撮影したマルチスペクトル画像の青色波長(図 3.1.5)と緑波長(図 3.1.7)を用いて求めた B/G。海色の差などは確認できない。

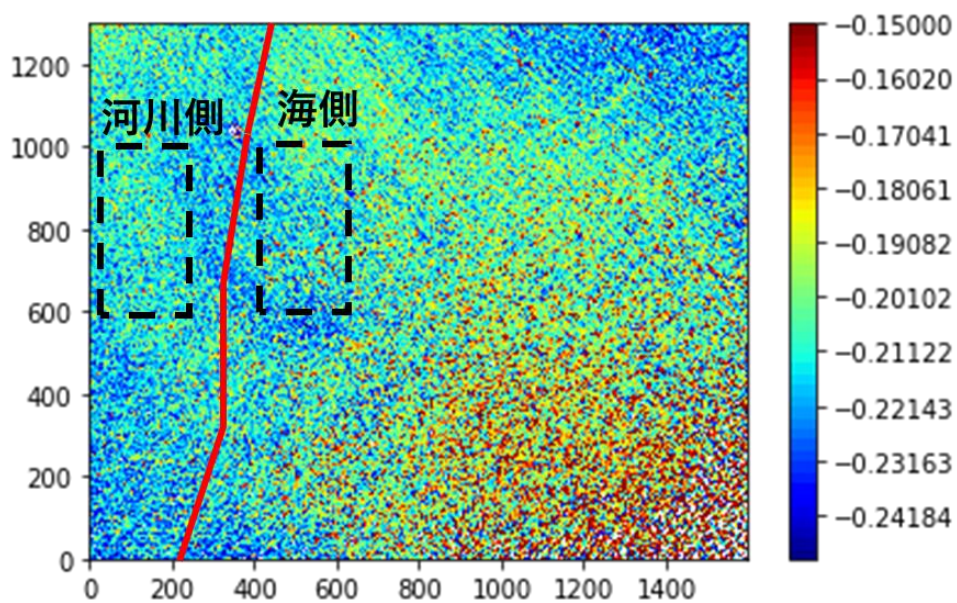


図 3.1.10 図 3.1.9 と同じ画像である。赤線は河川フロントの位置、点線四角は値の平均値を求めた範囲である。

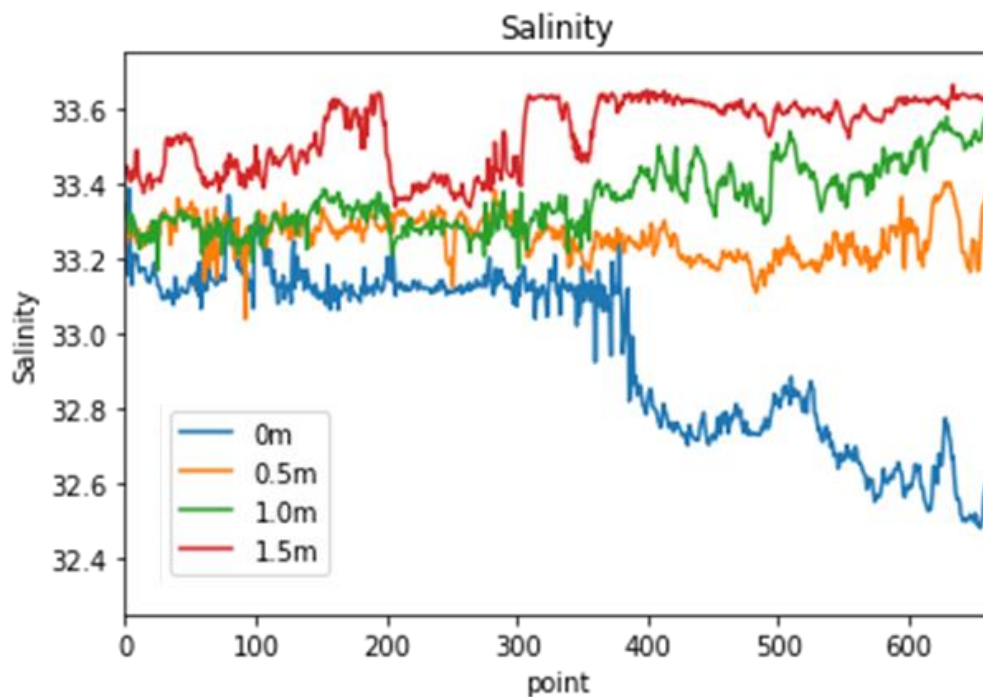


図 3.1.11 大槌湾で測定した塩分プロット。青線が 0m、黄色線が 0.5m、緑線が 1.0m、赤線が 1.5m の値を示している。縦軸は塩分、横軸は水上ドローンが進んだ距離を示しており 1point 約 0.5m である。point400 あたりで急激な変化がみられる。

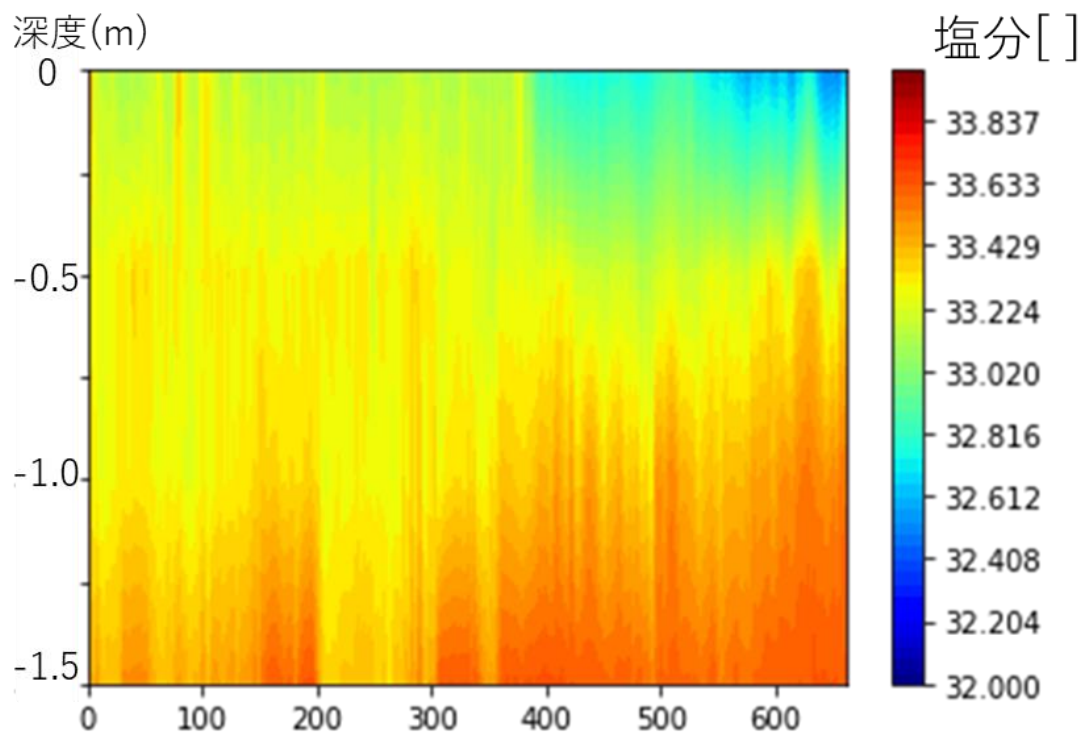


図 3.1.12 大槌湾で測定した塩分のコンター図。point400 あたりで急激な変化がみられる。塩分が小さいことから右上に河川水層が 0.5m 以下で存在することが分かる。

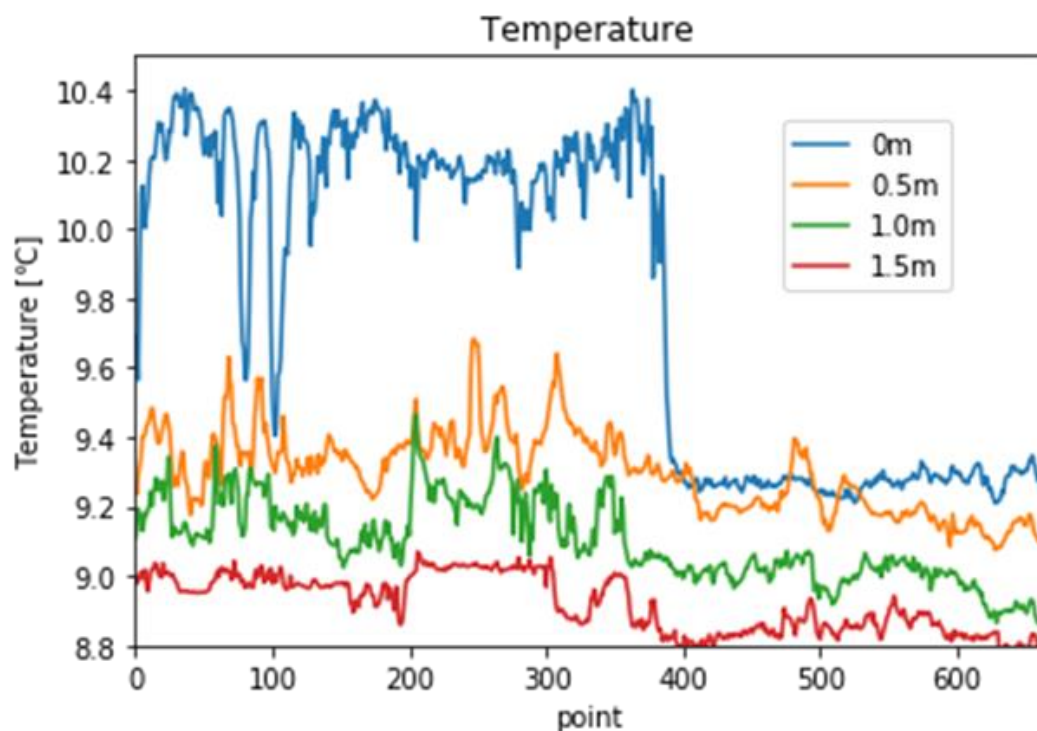


図 3.1.13 大槌湾で測定した水温プロット。青線が 0m、黄色線が 0.5m、緑線が 1.0m、赤線が 1.5m での値を示している。縦軸は水温、横軸は水上ドローンが進んだ距離を示しており 1point 約 0.5m である。point400 あたりで急激な変化がみられる。

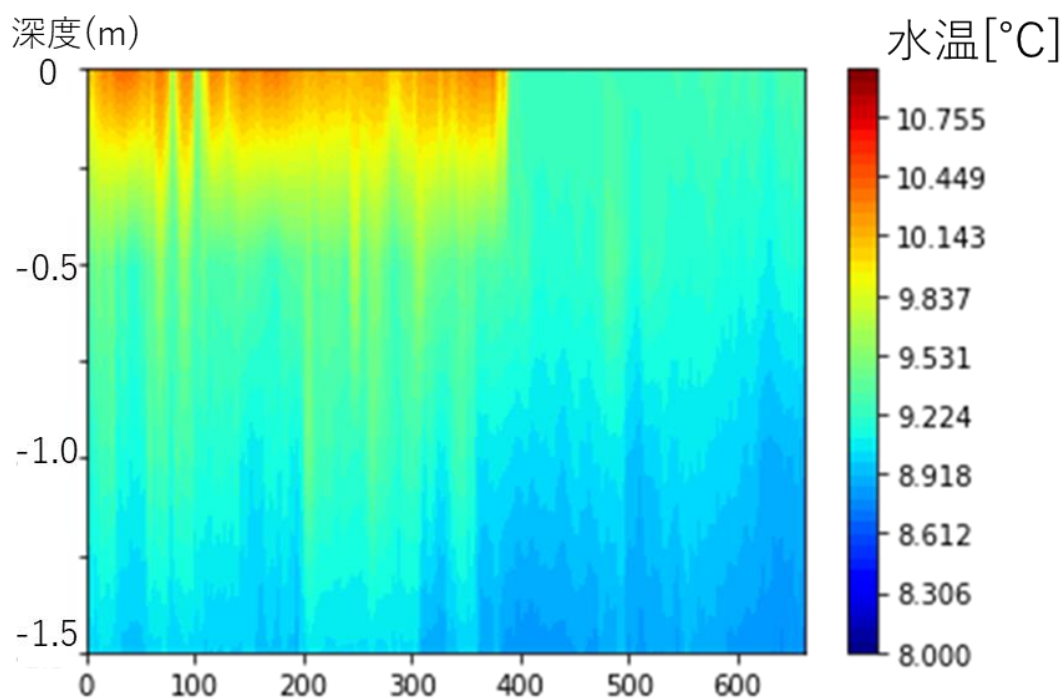


図 3.1.14 大槌湾で測定した水温のコンター図。point400 あたりで急激な変化がみられる。左上に水温の高い層がみられる。

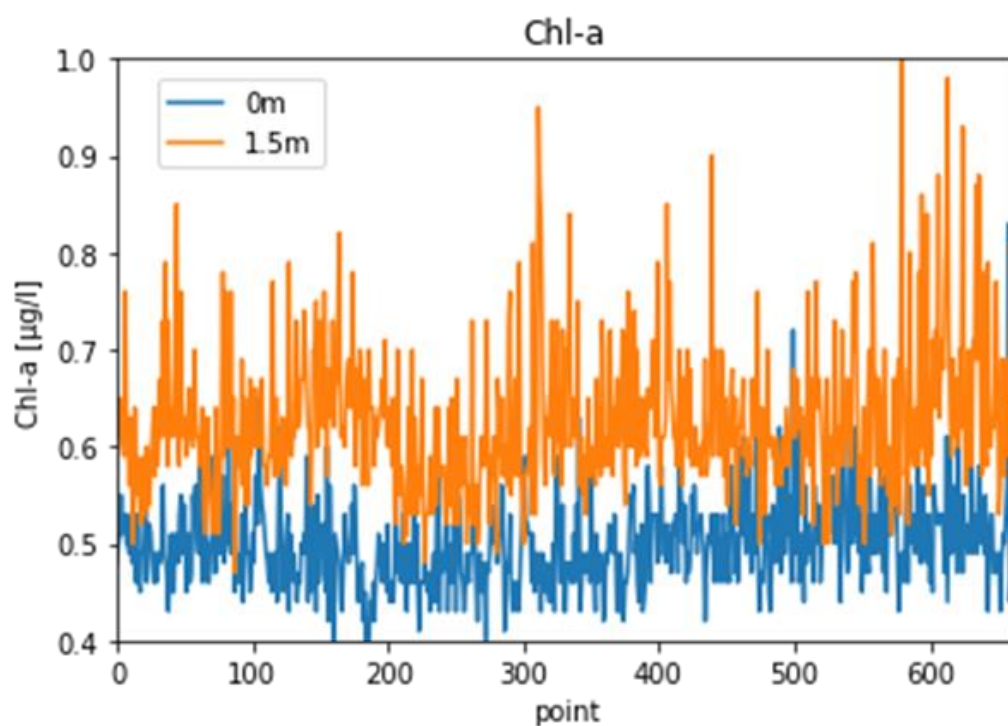


図 3.1.15 大槌湾で測定したクロロフィルプロット。青線が 0m、黄色線が 1.5m での値を示している。縦軸はクロロフィル、横軸は水上ドローンが進んだ距離を示しており 1point 約 0.5m である。水温や塩分のような急激な変化は見られない。表層の方がクロロフィル値が低いことが分かる。

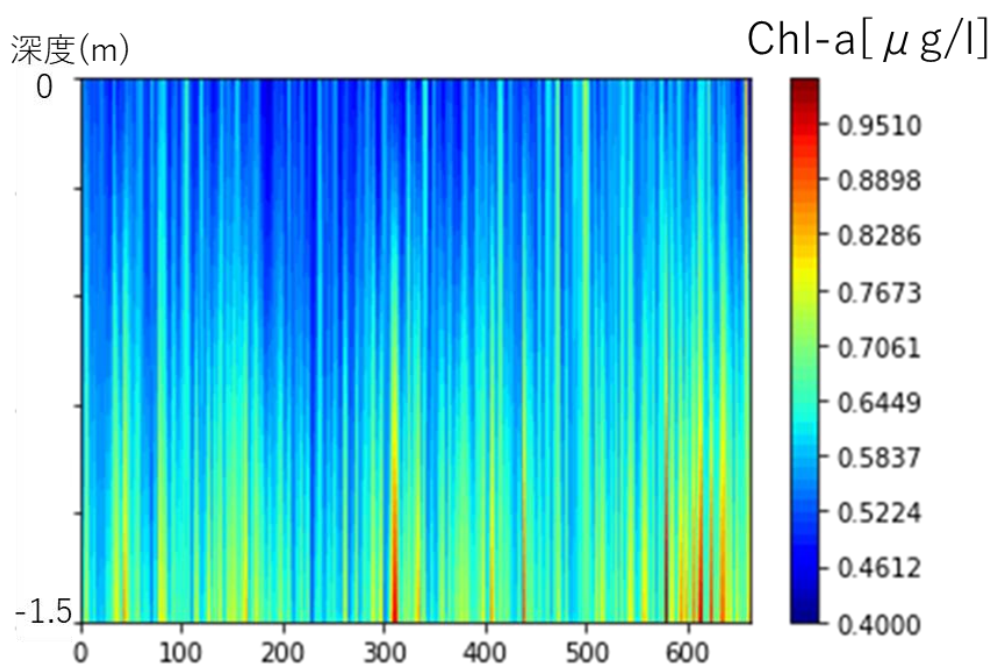


図 3.1.16 大槌湾で測定したクロロフィルのコンター図。表層の方がクロロフィル濃度が低いことが分かる。

第4章 厚岸湾の観測データの解析結果

4.1 厚岸湾での観測

4.1.1 観測の実施

10月4日は強風により観測は中止となったが、翌5日は観測することができ、予定していた観測内容を実施することができた。天候は曇りであり、太陽光による水面の照り返しが少なく空撮に適していた。厚岸湖と厚岸湾の水塊交換を観測するために大橋付近での観測を行い、別寒辺牛川の流出水と厚岸湖の水塊交換の観測をするために河口付近で観測を行った(図 4.1.1)。水上ドローンによる水塊データの測定は、大橋付近では水深が 1.5m 程度であったことから水深 1.2m まで観測し、河口付近では水深が非常に浅かったため水深 0.3m での観測のみ行った。大槌湾での観測と違い、厚岸湖では河川水と海水の色の差がはっきりしており(図 4.1.2、図 4.1.3)、ボートからの目視と空撮ドローンで空中から、河川フロントの位置が確認できた。

4.1.2 空撮ドローンによる観測

大橋の可視画像(図 4.1.4)では左上から中央あたりまで弧を描くような河川フロントと画像下 1/3 あたりから横に分断する河川フロントの2つのフロントがあることが確認できる。画像中央には我々が乗船していた小型ボートとボートに曳航される浮き、そして水上ドローンが写っている。また、画像右上に見える黒い線状のものは漁具である。

同時刻における大橋のマルチスペクトル画像青色波長(図 4.1.5)では、画像左上から中央あたりまで弧を描くような河川フロントが確認できる。画像中央の白い部分は小型ボートであり、その下には曳航されている水上ドローンが見える。また、画面全体で海面の波による値の上下が確認できる。緑色波長(図 4.1.6)でも、画像左上から中央あたりまで弧を描くような河川フロントと、画像下 1/3 あたりから横に分断する河川フロントの2つのフロントがあることを確認することができる。青色波長と緑色波長を比較すると、青色の方は全体的に色の差は少なく、緑色の方が明瞭にスペクトル値の差が見える。

マルチスペクトル画像の青色波長(図 3.1.4)と緑色波長(図 3.1.5)の値を用いた B/G(図 4.1.7)では、画像 1/3 を横に分断するフロントと、左上から斜め下に伸びるフロントの2つの河川フロントを確認することができる。特に横に分断する河川フロントについては、海色の差の特徴を大きくとらえることができた。河川フロントはきれいなまっすぐな直線や曲線でなく蛇行していることがわかる。青色波長と緑色波長の単独の画像では画像中央に周囲に突出して値の高い部分が見えるが、B/G を求めることで突出した部分が補正されており、これは割り算を行うことで放射照度の補正が行われたからと考えられる。海域と河川域でそれぞれの色の差が明瞭になっていることや左側の斜めになっているもう一つのフロントも見やすくなっている。

河口の可視画像(図 4.1.8)では大橋付近で実施した観測ほど海色に明確な差は見られなか

ったが、画像の中心に泡の集積による線構造が確認でき、河川フロントを撮影することができた。画像左には我々が乗船していた小型ボートが写っており、つながっているロープの先には曳航されている浮きと水上ドローンが画像中央あたりに見える。

同時刻における河口のマルチスペクトル画像青色波長(図 4.1.9)でも画像の中央に縦方向に延びる河川フロントが存在することがわかる。また、河川フロントの下半分には値の大きな部分が存在しフロントが太くなっているように見える。中央の明瞭な河川フロントとみられる泡列のほかに、左右で小規模な泡列も存在している。画面左上に見える白い点は小型ボートであり、ボートから真横に伸びている線は水上ドローン曳航用のロープである。また、画面全体で海面の波による値の上下が確認できる。緑色波長(図 4.1.10)では画像中央の縦方向の河川フロントを境に明確に反射スペクトル値の差があることが確認できる。青色波長と緑色波長を比較すると、青色波長では泡列が特に強調されてよく見え、緑色波長では海色の差が明瞭に表れている。

マルチスペクトル画像の青色波長(図 4.1.9)と緑色波長(図 4.1.10)の値を用いた B/G(図 4.1.11)では、河川フロントの泡列の線構造よりも左に海色の境界があることが分かる。

4.1.3 水上ドローンによる観測

厚岸湾で水上ドローンにより測定した深度毎の塩分、水温、クロロフィルデータを示しており、河川フロント前後水塊データの変化をみることができる。なお、垂下させたロープの傾斜を確かめるために最下端に取り付けた深度計による測定結果では、常に数センチ程度の差であり、各深度の水塊データ観測の結果に影響を与えるものではなく、正確に測定が行えたといえる。水塊データのプロット図とコンター図は、どちらも同じデータを使用しており、表現方法が異なるだけである。プロット図では、水上ドローンが通った軌跡上の水塊データを 1s 毎にプロットしている。大橋付近では水深が 1.5m ほどであるため、0.3m、0.6m、0.9m、1.2m の 4 点で測定した。水塊データのコンター図では、実際の海中の状態をイメージしやすいように水塊データの鉛直断面分布を表している。

大橋での塩分のプロット図(図 4.1.12)では、point130(以降、1pont は約 0.7m であることに留意)当たりで表層 0.3m の値に急激な変化が見られることから、河川フロントが存在することがわかる。また、point50 のあたりでは 0.3m、0.6m、0.9m で大きな変化が見られた。0.3m では塩分が周囲に比べて上昇、0.6m、0.9m では塩分が低下したことから海水の鉛直混合が起きていたと考えられる。常に深いほど塩分の高くなる成層が確認された。コンター図(図 4.1.13)からも point125 あたりで左右での塩分分布に明確な差が存在し河川フロントがあることが分かる。フロントの右側ではほとんど一様な塩分分布となっている一方、フロントの左側では水面付近と水中で大きな塩分差があることから水面付近には河川水の層ができていると想定できる。7m 程度の間で塩分が高いところから低いところへ変化している。

水温のプロット図(図 4.1.14)では、point125 当たりで 0.3m の表層の値に急激な変化が見られ、河川フロントが存在することが分かる。また、point60 のあたりでは 0.3m、0.6m、

0.9mで大きな変化が見られた。0.3m では水温が上昇、0.6m、0.9m では水温が低下していることから、海水の鉛直混合が起きていることが考えられる。河川水域からフロントまでは深いほど水温が高くなっているが、point160、point200 付近の二か所では表層の水温が一番高く、水底の水温が一番低くなっていた。周囲の冷たい海表面水がこの二か所の海底で水平輸送されているため、このような温度の変化があると考えられる。塩分はフロント以降(point150 以降)できれいな成層構造を持っていたのに対し、水温は変動が見られ成層構造が弱いことが分かる。コンター図(図 3.1.15)からも、point125 あたりで左右での水温分布に明確な差が存在し、河川フロントがあることが分かる。塩分場と同様にフロントの右側ではほとんど様な水温になっている。フロントの左側では水面付近と水中で大きな水温差があることから、水面付近には河川水の層ができていると想定できる。

大橋でのクロロフィルのプロット図(図 4.1.16)では Point125 あたりですべての深度において急激な値の変化が計測され、河川フロントがあることがわかる。また、0.6m、0.9m、1.2m の値は、河川側からフロントまでは低い値を持っていたが、フロントに近づくにつれて大きくなっている。フロントを超えるまで表層 0.3m でクロロフィル濃度は一番高い値を持っているが、フロントを超えた後は 1.2m 深でクロロフィル濃度が大きくなっている。水温・塩分と比べて、河川水側で値が大きいことや値の増減も真逆に近い動きをしている。のコンター図(図 4.1.17)からも、point125 あたりで左右でのクロロフィル分布に明確な差が存在し、ここに河川フロントがあることが分かる。表層の河川水層ではクロロフィルが大きくなっており、海水側では低くなっている。

河口付近では水深が 0.5m 程度だったため、0.3m の一点のみの測定を行った。そのため大橋のような鉛直断面分布図は作成できなかった。塩分のプロット図(図 4.1.18)で point90 から point120 の間に値がわずかに小さくなっている(以降、point は約 0.4m であることに留意)が、河川フロントがあると断言できるほどの大きな差は観測できなかった。河口での水温のプロット図(図 4.1.19)では、point90 から point120 の間に値が小さくなっている。この辺りに河川フロントがあることが考えられる。水温の方が塩分よりも変動が大きかった。クロロフィルのプロット図(図 4.1.20)では、point70 あたりから周囲に突出して高い値が計測されており、観測機器のエラーであると考えられる。水深が非常に浅かったため水底の泥を巻き上げてしまった可能性や、水面付近に大量に浮くアマモ片がセンサー部分に干渉した可能性が考えられる。

4.2 厚岸湾観測についての考察

厚岸湾の観測では、大槌湾に次いで、空撮ドローンと水上ドローンによる直接観測を組み合わせる二回目の観測であった。厚岸湾は海色と河川水の色之差が大きかったため、大槌での観測より明瞭に河川フロントが観測できた。

大橋での水上ドローンでの観測では、水深が約 1.5m と非常に浅かったため、1.2m 垂下させた観測機器によって表層から水底までの水塊データを観測することができた。水塊デ

ータの塩分・水温・クロロフィルのコンター図から、成層している表層の河川水は、河川フロントを境界に鉛直下方向に輸送されたと考えられる。また、クロロフィルのプロット図では海側の水底で最も高い値を示していることから、河川水は海側の水底まで流れていることが考えられる。このように、河川フロントの直接観測を行うことでフロント内での水の動きを追跡することができる。今回は4点での水塊データの観測であったが、今後の観測では観測機器の数を増やすことで詳細な断面構造を観測することが可能になり、水の混合メカニズムの解明につながる観測ができると考えられる。

河口付近での観測では、空撮による海色の差が大きかったにも関わらず、水塊データに大橋ほどの差は見られなかった。また、河口の河川フロントは河川側と海側を分断するようなものでなく、河川水が細い帯状となり泡列の周辺にのみ流れていると予想できる。この時の船は右から左に動いており、速さが0.4m/sec程度であり、塩分の下がっている部分が観測時間にして約50sであるので泡列の周辺に20m程度の河川水の帯のようなものが存在すると考えられる。また、クロロフィル観測では、観測器のエラーで観測することができなかった。使用するクロロフィル計にはセンサー部にガードなどを付ける必要がある。

大橋でのマルチスペクトル画像を用いて求めたB/Gの値をクロロフィル濃度の推定に使用することが可能か検討する。Goddoin and White(2005)によると、RGB値から求めたB/G値がクロロフィル濃度を表すと述べられている。大橋でのB/Gで河川側・河川フロント付近・海水側(図内①・②・③)の三か所での表層0.3mでのクロロフィルの実測値とB/Gの値の相関を調べた(図4.1.21)。クロロフィルの実測値は30sの平均を求めた。河川側・河川フロント付近・海水側でそれぞれ、 $2.957\mu\text{g/l}$ 、 $2.595\mu\text{g/l}$ 、 $2.543\mu\text{g/l}$ であった。B/Gの値は30sでボートが進んだ距離と同等の $200\times 200\text{pixel}$ での平均値を求めた。河川側・河川フロント付近・海水側でそれぞれ、-0.2037、-0.2482、-0.2864であった。表層でクロロフィル値の大きい河川側ではB/Gの値が大きくなっており、クロロフィル値の小さい海側ではB/Gの値が小さくなっていることが分かる(図4.1.22)。このように正の相関があることが分かり、B/Gがクロロフィル濃度の指標となる可能性は高いことが分かった。



図 4.1.1 厚岸の観測ポイント。丸印の位置で河川フロントを発見し観測した。(地図は Google Maps(<https://www.google.co.jp/maps/>)より)



図 4.1.2 厚岸湾大橋の河川フロントを上空から斜め方向に見下ろした空撮画像。左下図の矢印は撮影した位置と方向。(地図は Google Maps(<https://www.google.co.jp/maps/>)より)

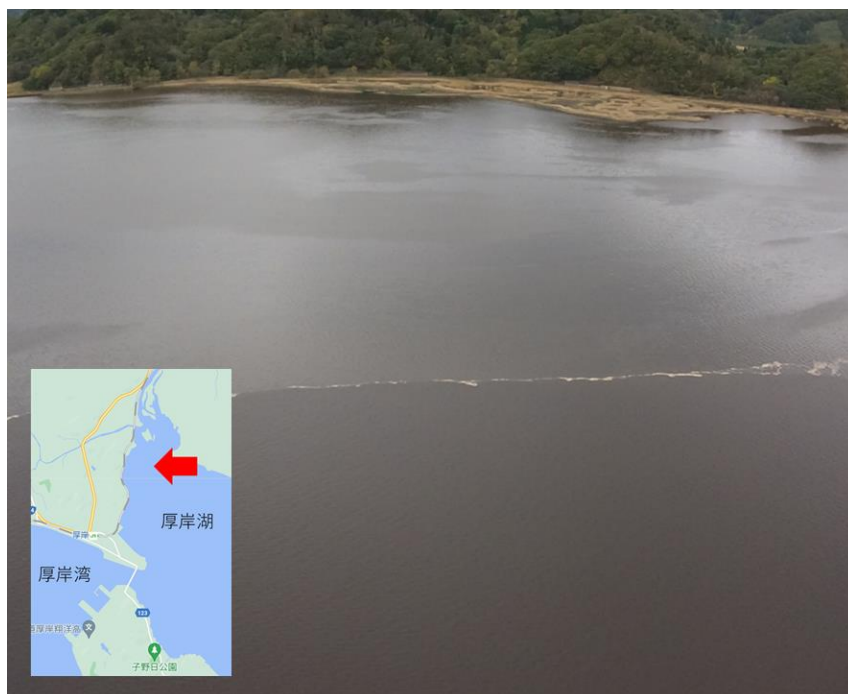


図 4.1.3 厚岸湾河口の河川フロントを上空から斜め方向に見下ろした空撮画像。左下図の矢印は撮影した位置と方向。(地図は Google Maps(<https://www.google.co.jp/maps/>)より)

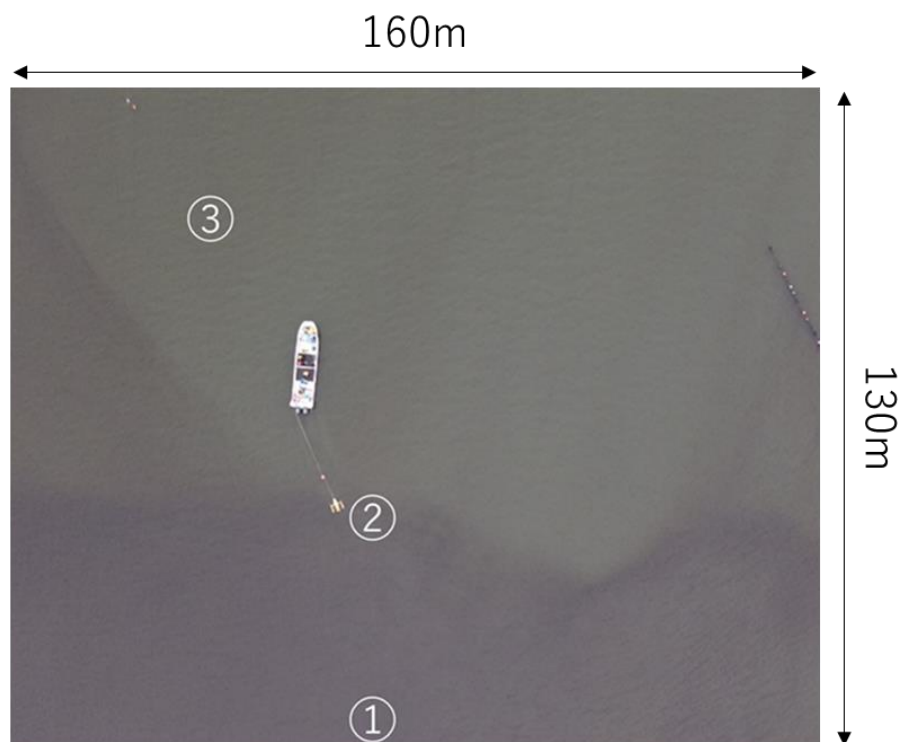


図 4.1.4 大橋の河川フロント可視画像。海色の差がはっきりわかる。番号①②③は以降に出てくる水塊データとの位置関係を示している。

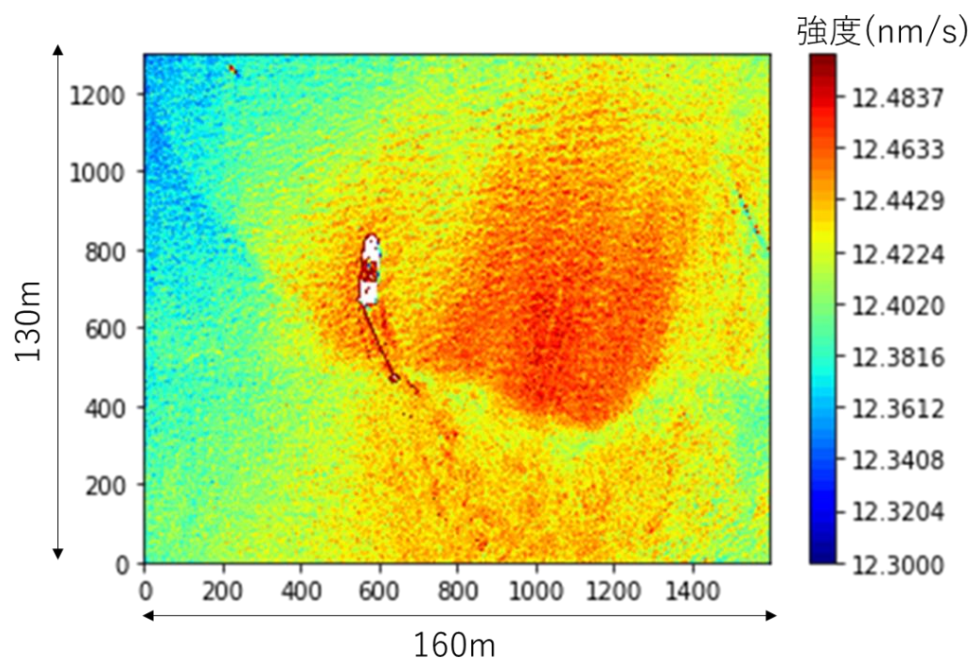


図 4.1.5 厚岸湾の大橋で撮影したマルチスペクトル画像(青色波長)。左上から中央付近にかけて河川フロントが見える。可視画像(図 4.1.4)と同時に撮影したものである。

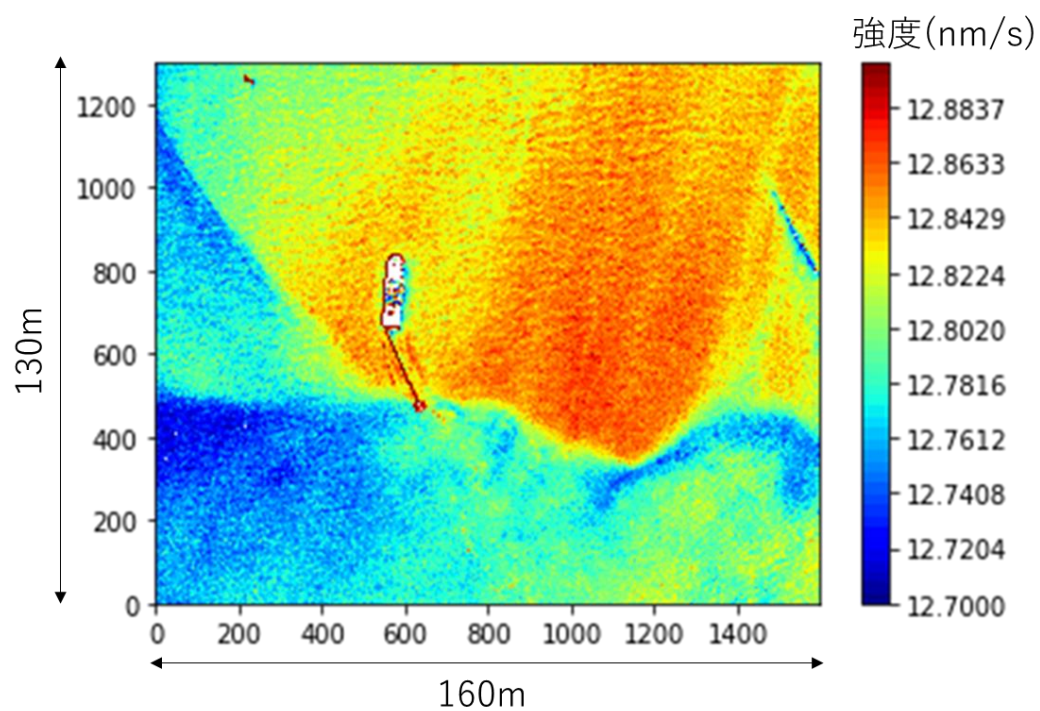


図 4.1.6 厚岸湾の大橋で撮影したマルチスペクトル画像(緑色波長)。左上から中央付近にかけて河川フロントが見える。また、中央を左から右に分断する河川フロントも見える。
可視画像(図 4.1.4)と同時に撮影したものである。

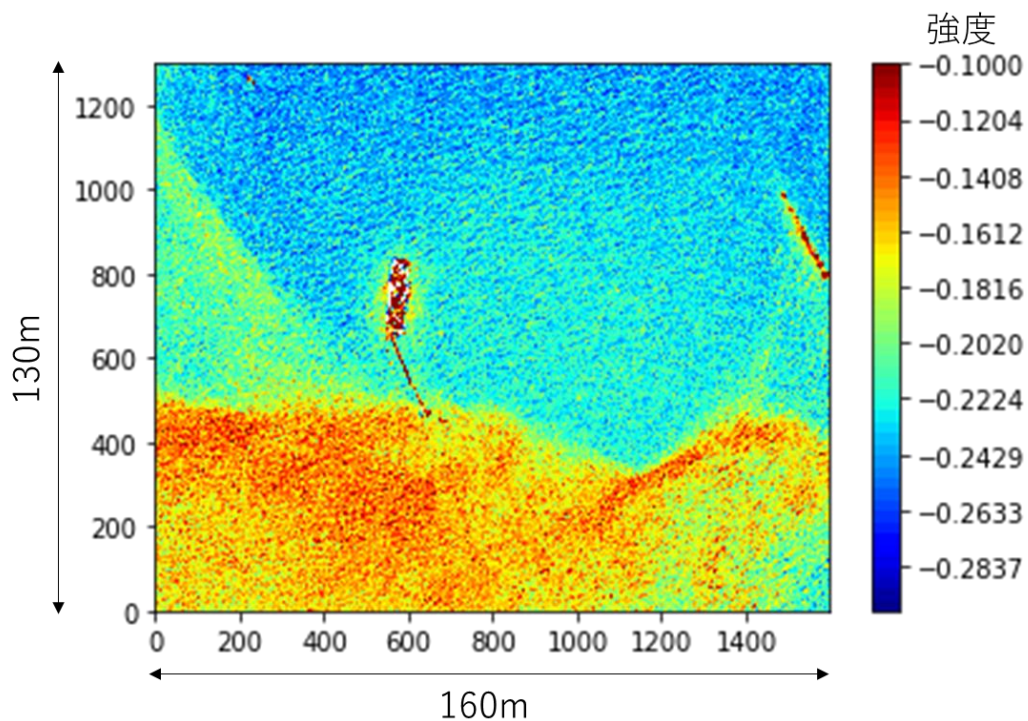


図 4.1.7 大橋の河川フロントで撮影したマルチスペクトル画像の青色波長(図 4.1.5)と緑色波長(図 4.1.6)を用いて求めた B/G。海色の差が明瞭に確認できる。



図 4.1.8 厚岸湾の河口で撮影した可視画像である。縦方向に伸びる河川フロントによる泡列が確認できる。左側には曳航用のボート、中央には水上ドローンが写っている。

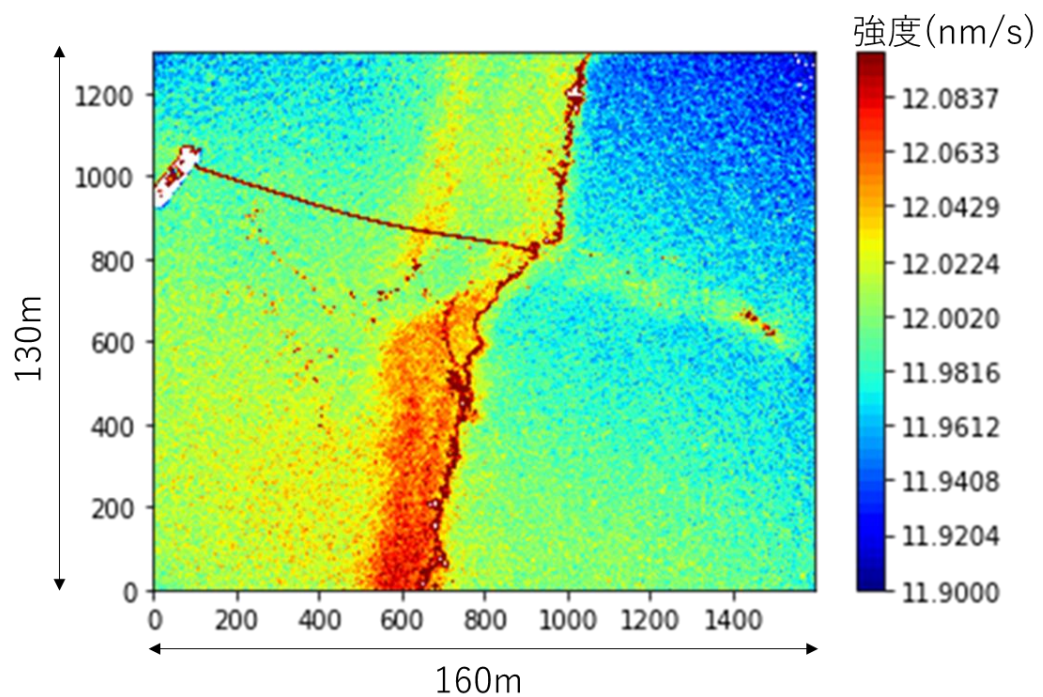


図 4.1.9 厚岸湾の河口で撮影したマルチスペクトル画像(青色波長)。縦方向に伸びる河川フロントが確認できる。左側には曳航用のボート、中央には水上ドローンが写っている。
可視画像(図 4.1.8)と同時に撮影したものである。

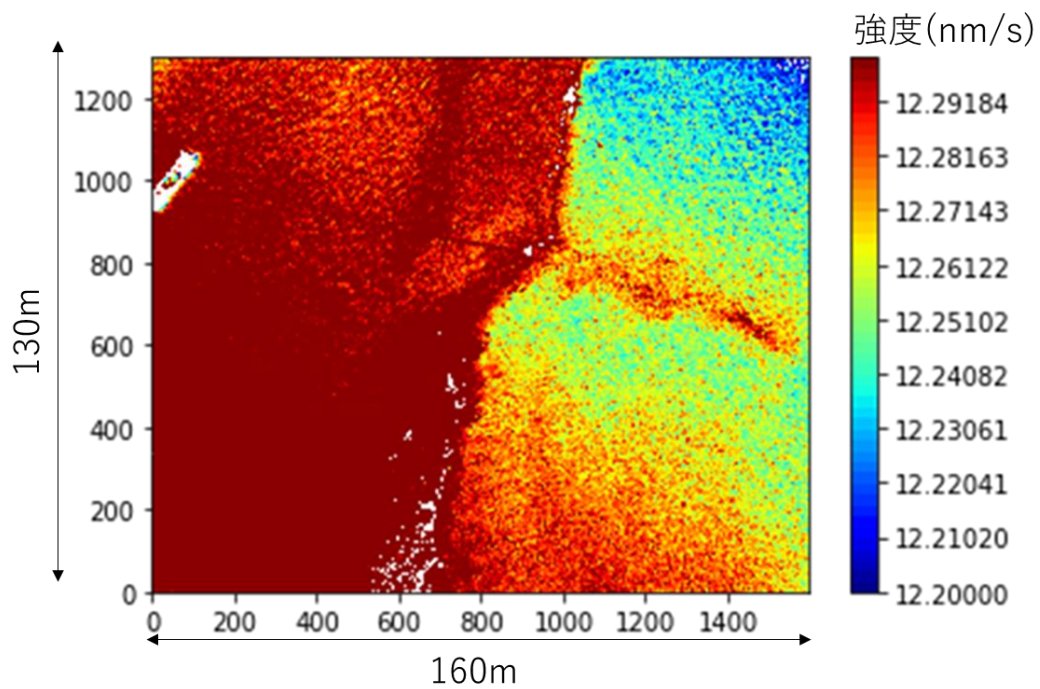


図 4.1.10 厚岸湾の河口で撮影したマルチスペクトル画像(緑色波長)。河川フロントの左右で海色の差に大きな違いが見える。左側には曳航用のボート、中央には水上ドローンが写っている。可視画像(図 4.1.8)と同時に撮影したものである。

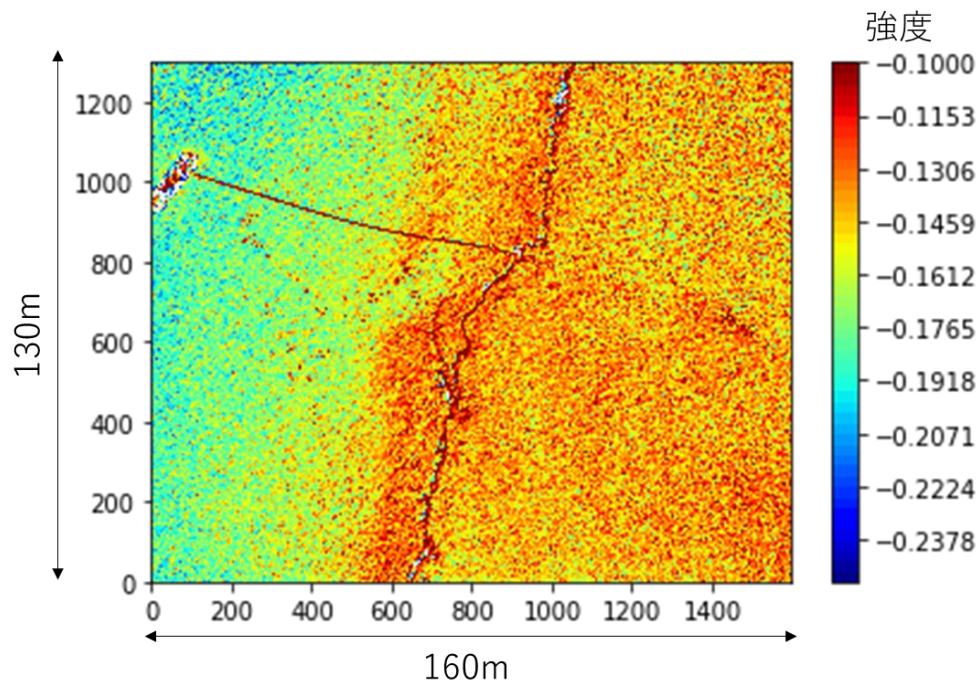


図 4.1.11 河口の河川フロントで撮影したマルチスペクトル画像の青色波長(図 4.1.9)と緑色波長(図 4.1.10)のをういて求めた B/G。

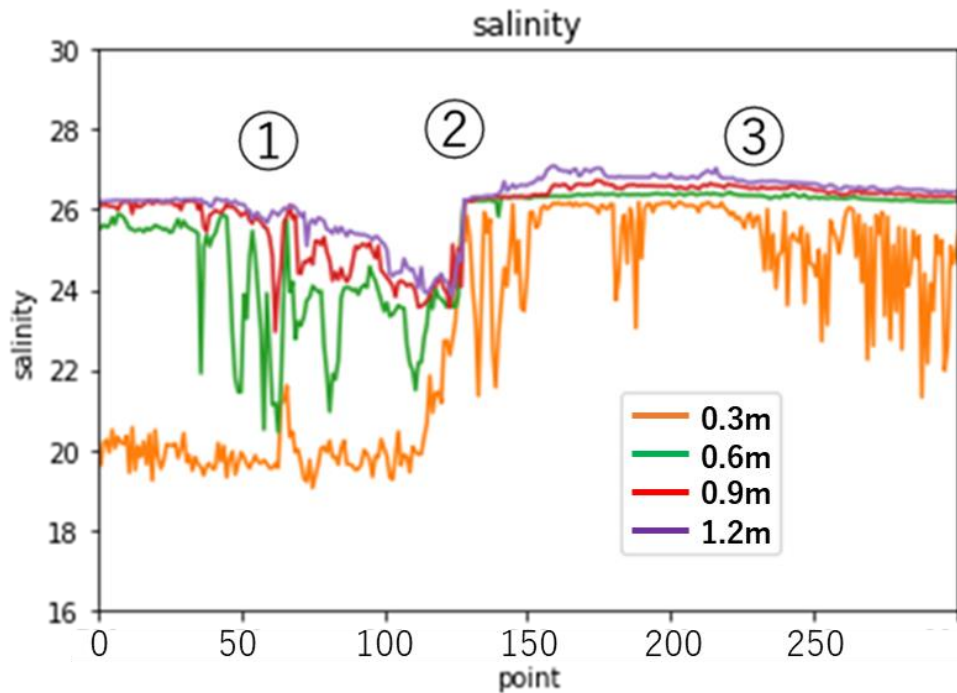


図 4.1.12 厚岸湾の大橋で測定した塩分プロット。黄色線が 0.3m、緑線が 0.6m、赤線が 0.9m、紫線が 1.2m での値を示している。縦軸は塩分、横軸は水上ドローンが進んだ距離を示しており 1point 約 0.7m である。河川側から海側に向かって河川フロントを跨いでいる。距離にして約 7m の間に急激に塩分が上がっている。

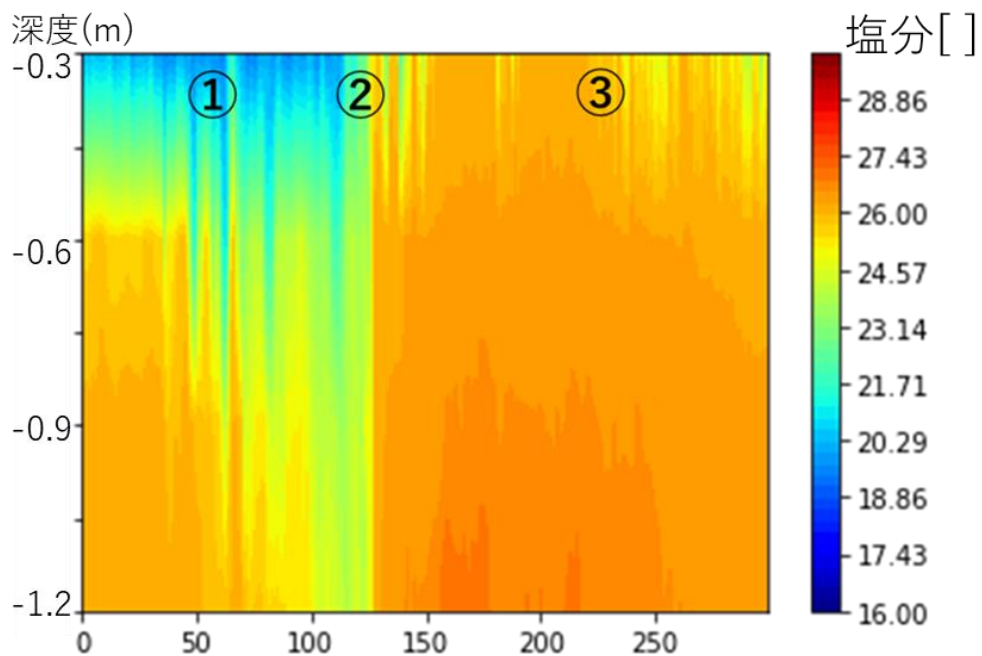


図 4.1.13 厚岸湾の大橋で測定した塩分のコンター図。河川側から海側に向かって河川フロントを跨いでいる。

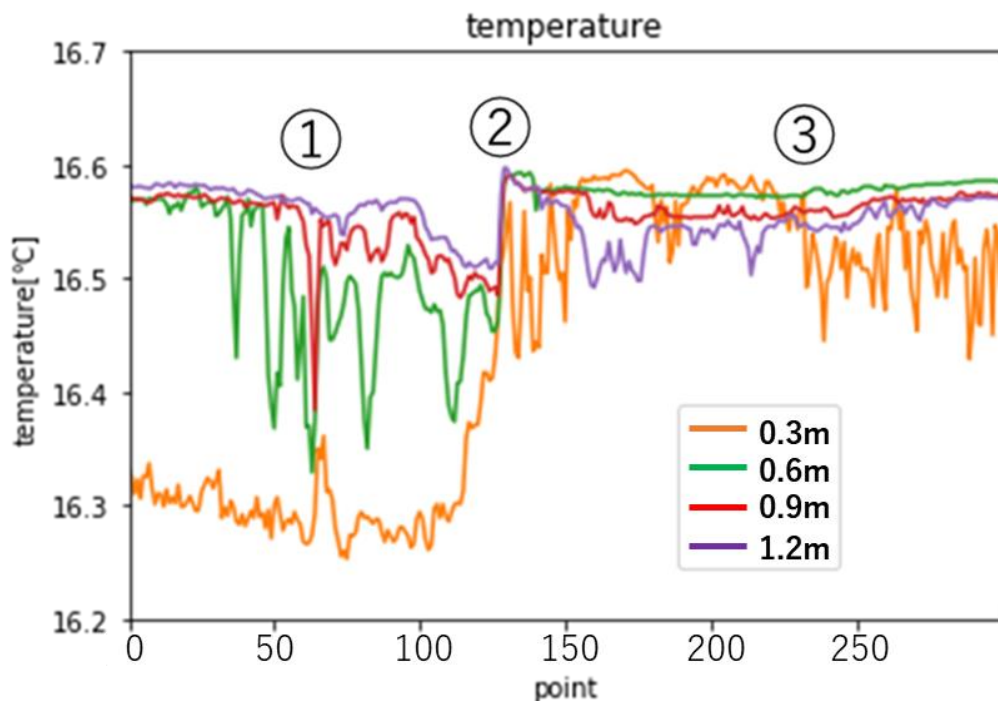


図 4.1.14 厚岸湾の大橋で測定した水温プロット。黄色線が 0.3m、緑線が 0.6m、赤線が 0.9m、紫線が 1.2m での値を示している。縦軸は水温、横軸は水上ドローンが進んだ距離を示しており 1point 約 0.7m である。河川側から海側に向かって河川フロントを跨いでいる。距離にして約 7m の間に急激に水温が上がっている。

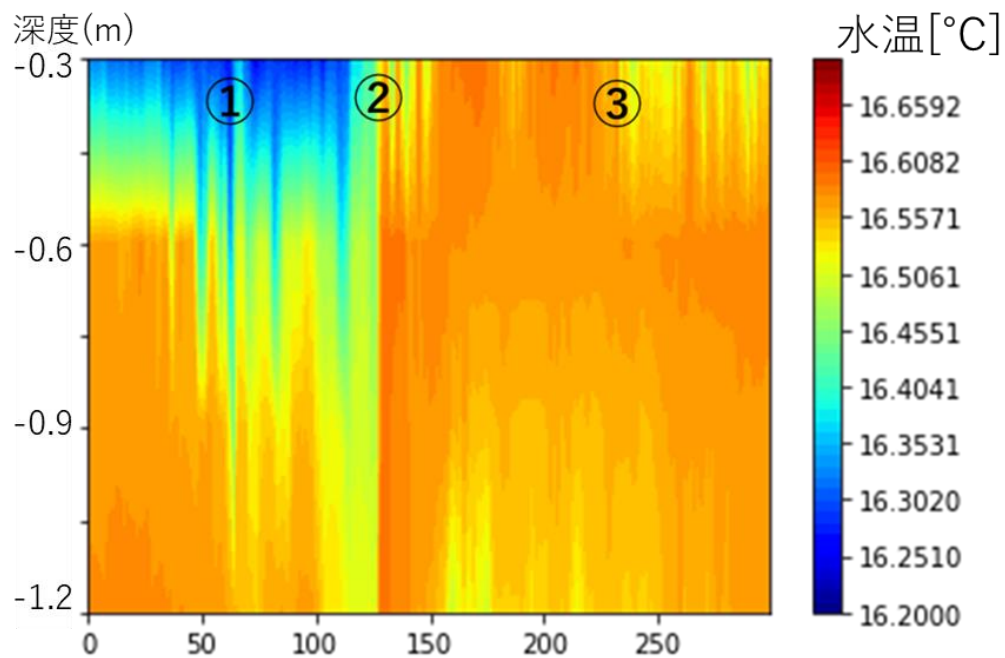


図 4.1.15 厚岸湾の大橋で測定した水温のコンター図。point130 あたりで急激な変化が見られる。

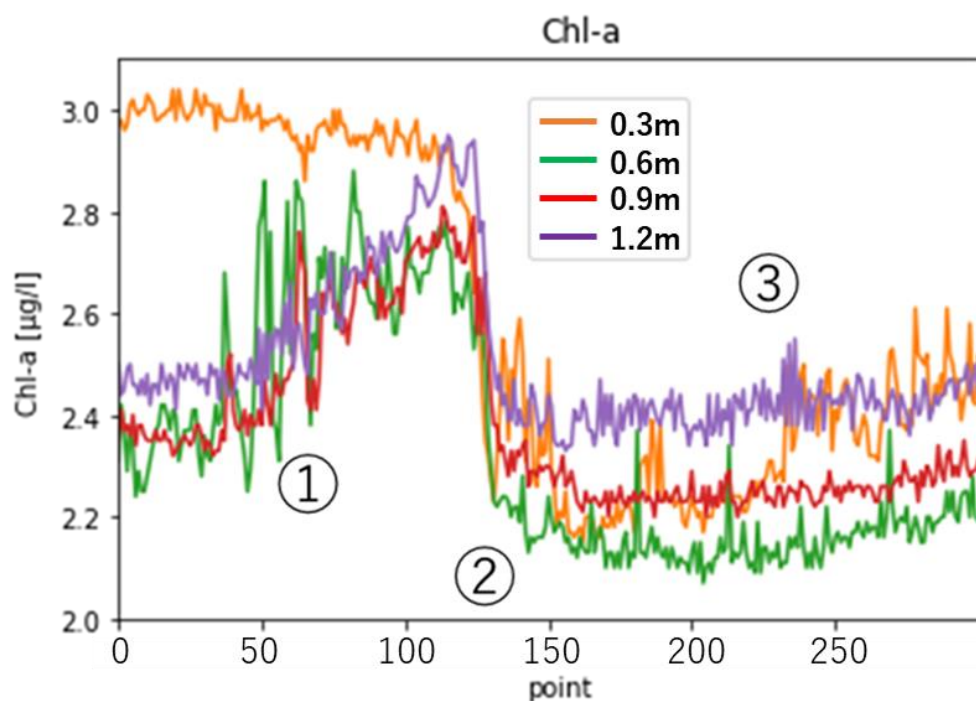


図 4.1.16 厚岸湾の大橋で測定したクロロフィルのプロット。黄色線が 0.3m、緑線が 0.6m、赤線が 0.9m、紫線が 1.2m での値を示している。縦軸はクロロフィル、横軸は水上ドローンが進んだ距離を示しており 1point 約 0.7m である。point130 あたりで急激なクロロフィル値の減少が見られる。

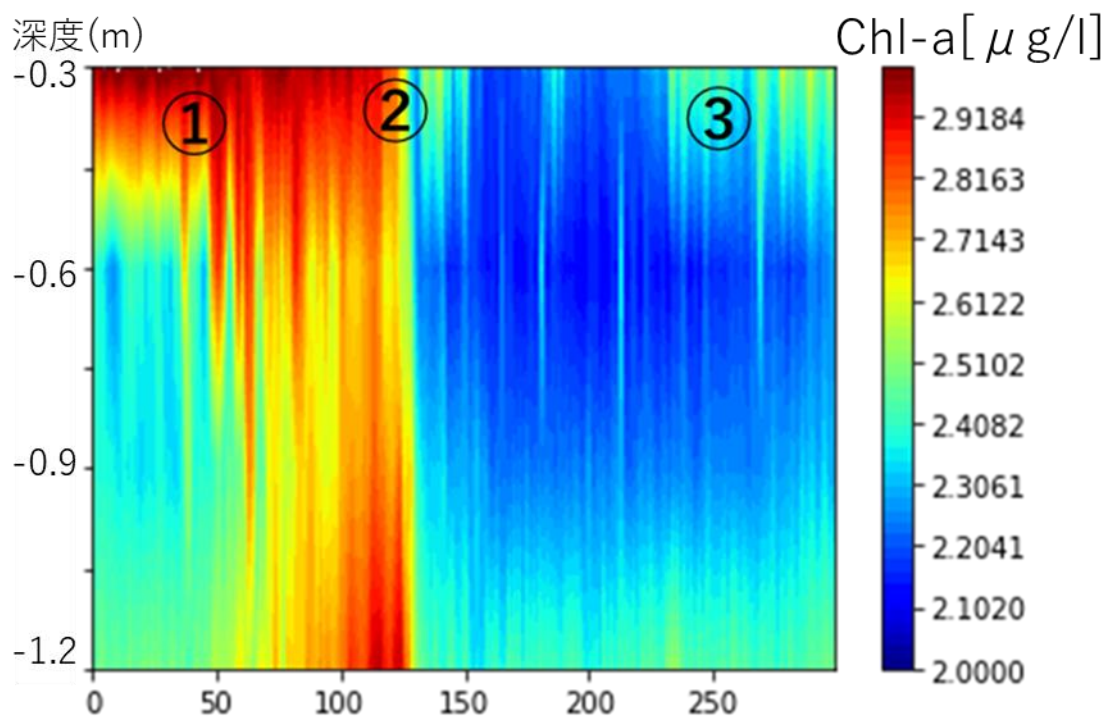


図 4.1.17 厚岸湾の大橋で観測したクロロフィルのコンター図。

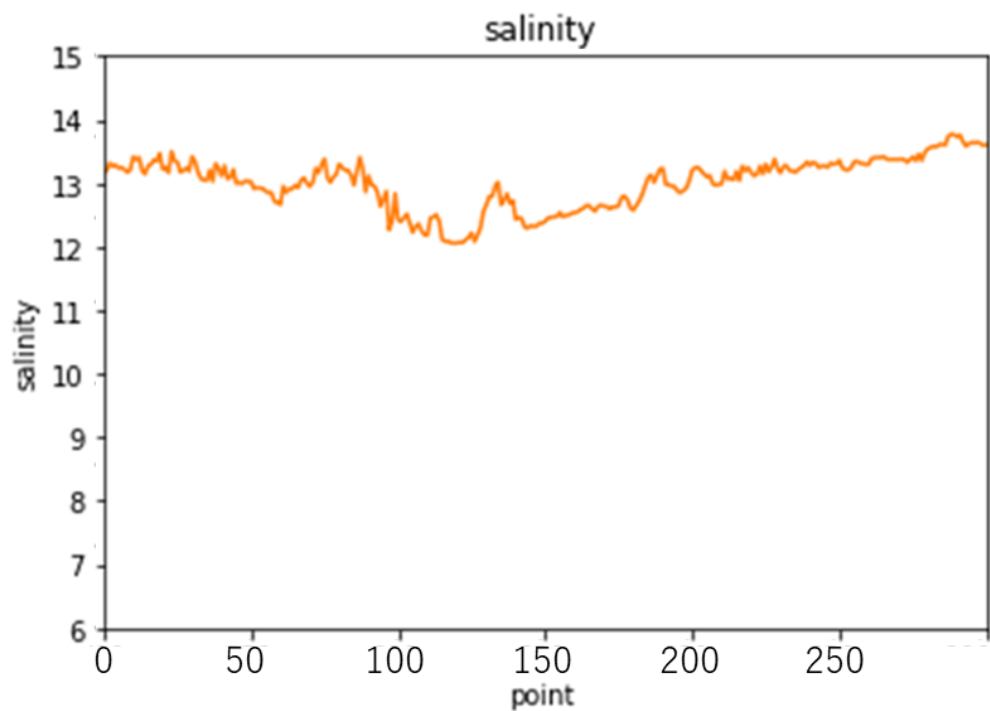


図 4.1.18 厚岸湾の河口で測定した塩分プロット。0.3m での値を示している。縦軸は塩分、横軸は水上ドローンが進んだ距離を示しており 1point 約 0.4m である。

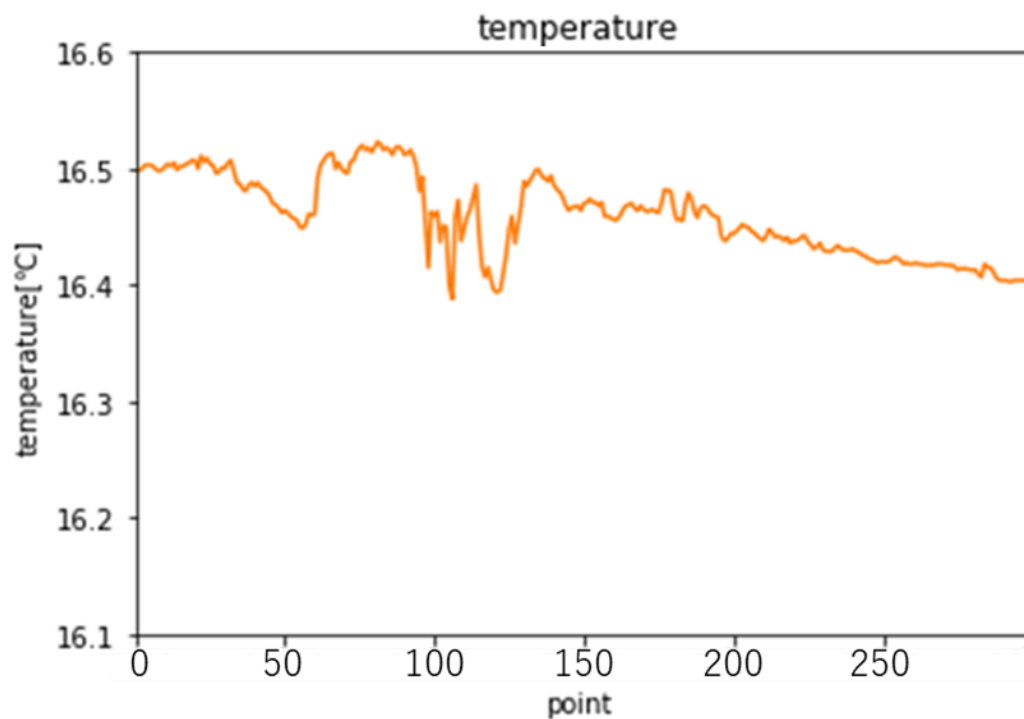


図 4.1.19 厚岸湾の河口で測定した水温プロット。0.3m での値を示している。縦軸は水温、横軸は水上ドローンが進んだ距離を示しており 1point 約 0.4m である。

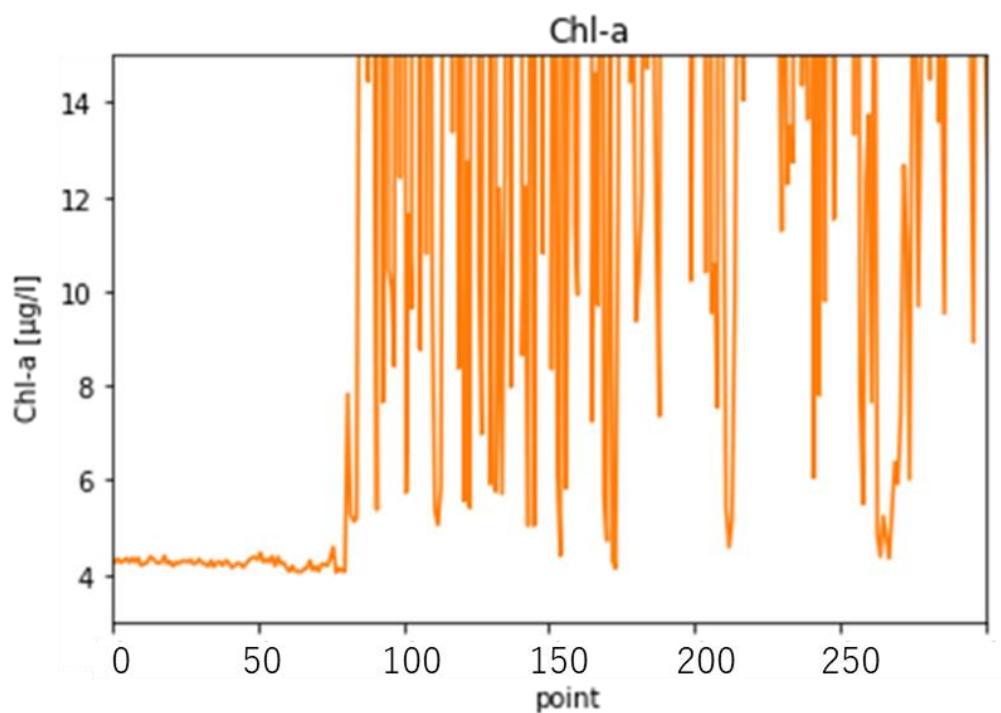


図 4.1.20 厚岸湾の河口で測定したクロロフィルのロット。0.3m での値を示している。縦軸はクロロフィル、横軸は水上ドローンが進んだ距離を示しており 1point 約 0.4m である。測定器がエラーを起こし正確に測定が行えなかった。

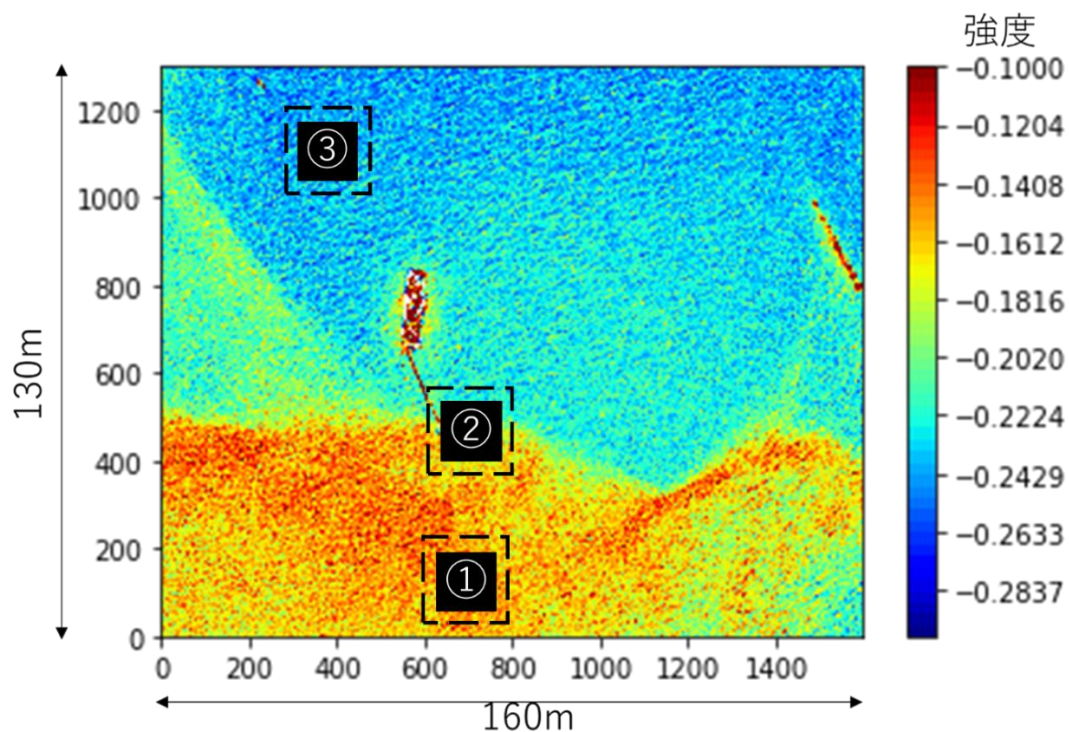


図 4.1.21 図 4.1.7 と同じで B/G を求めた図。①②③の 200×200 pixel の範囲における値の平均を求めた。

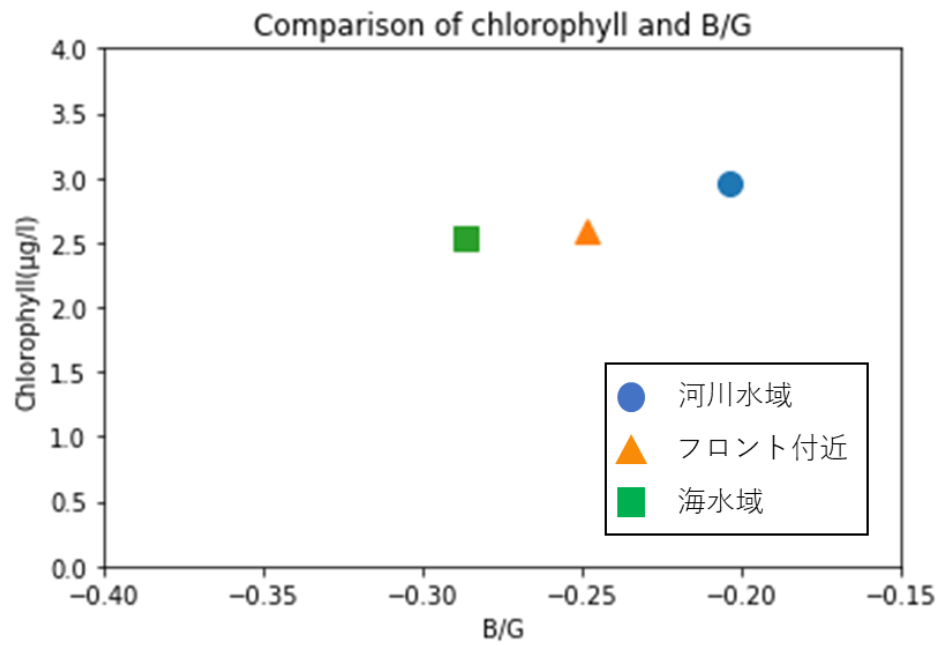


図 4.1.22 クロロフィルの実測値と B/G の値の比較。縦軸がクロロフィルの実測値、横軸が B/G の値である。正の相関がある。

5 章 まとめ

本研究の目的は、河川水と海水の境界である河川フロントをメートル以下の空間スケールで詳細に観測する手法の開発であった。既存の観測手法では河川フロントにおける海水と河川水の混合過程を観測することが難しいため、新たな観測手法として空撮ドローンを用いた上空からの撮影と水上ドローンを用いた水塊データの直接観測を組み合わせる観測手法を提案し、実験的に観測を行った。

空撮ドローンによる観測では、マルチスペクトル画像を用いることで海色の差を厳密に比較することが可能なことが明らかになった。マルチスペクトル画像は可視画像と比較して、太陽光の強さによるスペクトルの変化を校正できる点、表現不可能な色がない点、色に対する解像度が大きい点など優れた点が多くあり海色の解析に適していることが分かった。しかし、マルチスペクトル画像の欠点として、撮影したものをその場で確認することができず可視化の作業が必要になることである。現場の観測においては可視カメラにより撮影範囲や河川フロントの有無を確認しながら、マルチスペクトルカメラで観測することが必要である。

水上ドローンによる直接観測では、一定間隔の深度で水塊データを測定することで河川フロントの水中断面の構造を観測できることが明らかになった。また、空撮ドローンと水上ドローンによる観測を組み合わせることで、空撮画像の水上ドローンの位置から水塊データの位置を特定することができた。今後、観測機器の数を増やし機器同士の間隔を小さくすることで、より詳細な水中断面構造が観測できることが期待できる。しかし、現在使用している観測機器では水上ドローンの垂下許容重量を超過する恐れがあるため小型のセンサーを使用する必要がある。また、観測機器を垂下させた水上ドローンを複数用意し、同じ河川フロントに対して並行に航行することで、河川フロントの水中断面を線状でなく立体的に観測することが可能になる。

空撮ドローンにより得たマルチスペクトル画像で求めた B/G と直接観測したクロロフィルデータを組み合わせることでクロロフィル濃度の推定が行える可能性が確かめられた。今回は大橋のフロントについてのみ相関を調べたが、今後十分な相関関係の検証を行うことで線上観測の結果から空撮で得た画像全体のクロロフィル値を推測する手段として活用できる可能性がある。

このように、ドローンによる空撮では河川フロントの泡列や色の変化など水平構造が観測可能である。また、水上ドローンによる水塊データの直接観測を行うことで、河川フロントの鉛直断面構造を特定することが可能である。本研究で提案した空撮と直接観測の二つの観測を組み合わせる観測手法では河川フロントの水平構造と内部構造の両方を同時に観測することができ、河川フロント観測のための観測手法として十分に利用できると考えられる。

謝辞

本修士論文をまとめるにあたり、研究全般において終始適切な御指導ならびに御鞭撻を賜りました九州大学応用力学研究所の磯辺篤彦教授並びに木田新一郎准教授に深く感謝の意を表します。

本観測の実施に際しては、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にご協力頂きました。心から感謝致します。

本修士論文における観測の際は、東京大学大気海洋研究所国際沿岸海洋研究センター、北海道大学厚岸臨海実験所を使用させていただきました。ご協力いただきました研究所職員の方々に心から感謝致します。

研究に関して多くのサポートをして頂きました研究室の技術職員の皆様、秘書の皆様に厚く御礼申し上げます。

最後に、これまで終始私を支え励ましてくれた両親に心より感謝致します。

参考文献

1. 宇野木早苗、山本民次、清野聡子 (2008): 川と海 流域圏の科学, 築地書館, 297p
2. 岡英太郎、磯辺篤彦、市川香、升本順夫、須賀利雄、川合義美、大島慶一郎、島田浩二、羽角博康、見延庄士郎、早稲田卓爾、岩坂直人、河宮未知生、伊藤幸彦、久保田雅久、中野俊也、日比谷紀之、寄高博行 (2013): 海洋学の 10 年展望(Ⅰ)—日本海洋学会将来構想委員会物理サブグループの議論から—, 海の研究, 22(6), 191-218
3. 山本悠真 (2017): バルーンを用いた沿岸海洋の赤外リモートセンシングースタンドアローン化の試み—, 九州大学大学院総合理工学府大気海洋環境システム学専攻修士論文
4. 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
5. 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
6. 阿部稜 (2021): 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
7. P4 Multispectral スペック
URL : <https://www.dji.com/jp/p4-multispectral/specs>
8. DIC カラーデザイン株式会社 色彩関連情報
URL : <https://www.dic-color.com/knowledge/xyz.html>
9. P4 Multispectral Image Processing Guide
URL : https://dl.djicdn.com/downloads/p4-multispectral/20200717/P4_Multispectral_Image_Processing_Guide_EN.pdf
10. Yasuyuki MIYAO, Atsuhiko ISOBE(2017): An Attempt to Visualize Coastal Oceanic Features Using an Infrared Camera Suspended by a Balloon, Journal of The Remote Sensing Society of Japan 2017, Volume 37, Issue 2, Pages 112-123
11. Yasuyuki MIYAO, Atsuhiko ISOBE, Shinichiro KAKO(2014): An Application of Low-

altitude Remote Sensing Using a Vessel-towed Balloon for Monitoring Jellyfish Patchiness in Coastal Waters, Journal of The Remote Sensing Society of Japan 2014, Volume 34, Issue 2, Pages 113-120

12. L.M.Goddijn and M.White(2005):Using a digital camera for water quality measurements in Galway Bay, Estuarine, Coastal and Shelf Science 66 (2006) 429-436