

ドローンによる沿岸海洋過程の高解像観測手法の開発

石元, 伸
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/2324/2558972>

出版情報 : 九州大学, 2018, 修士, 修士
バージョン :
権利関係 :

修 士 論 文

題 目 ドローンによる沿岸海洋過程の高解像観測手法の開発

平成 29 年度入学

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

氏 名 石 元 伸

指導教員 磯 辺 篤 彦 教 授

木 田 新 一 郎 准 教 授

平成 31 年 1 月 30 日 提出

目次

Abstract

第1章 はじめに.....1

1.1.研究背景

1.2.観測対象

第2章 手法.....4

2.1.ドローン観測の概要

2.1.1. ドローン

2.1.2. 本研究で使用したドローン

2.1.3. 自動飛行用アプリ DJI GS PRO

2.2. 観測手法と実施内容

2.2.1. 空撮手法

2.2.2. 厚岸観測

2.2.3. 瀬戸内海観測

2.3.撮影画像の合成

2.3.1. GPS 情報

2.3.2. オーバーラップ率

第3章 結果.....24

3.1.観測の状況

3.2.撮影した可視画像

3.3.画像解析

3.3.1. 渦構造などの空間情報の抽出

3.3.1.1. 部分的平均値補正

3.3.1.2. CIELuv 色空間での勾配計算

3.3.2. 河川水と海水の判別方法

第4章 考察.....53

4.1.観測手法

4.2.可視画像の画像解析について

4.2.1.合成する際の注意点

4.2.2.CIELuv 色空間変換

4.2.3.CDOM、クロロフィル濃度

第5章 おわりに..... 61

参考文献

謝辞

Abstract

本研究では、人工衛星より低高度でリモートセンシングを行い、可視カメラのみ搭載したドローンを沿岸域の海洋観測へ導入することで、バルーン観測の際の欠点であった機動性や射影変換処理をせず、低コストで1 km²の範囲かつ5cm程度の超高解像度で観測する手法の開発が目的である。可視カメラのみで観測を行なった理由として、熱赤外カメラに比べ、高解像度であり、より広範囲を撮影することが可能であるためである。そこで、北海道道東に位置する厚岸湖周辺や瀬戸内海の伊予灘で河口フロントを対象に海色観測を行った。河口フロントを対象にしたのは、海流は見た目からは判断が難しいが、河口から沖合に移るに従って、水塊特性が変化し、海色にそれが反映されるためである。すなわち、本研究では、人工衛星に比べ時間・空間分解能に優れた可視カメラ搭載のドローンで観測した海色を水塊追跡のトレーサーとした。観測方法や観測で得た可視画像の合成方法に関しては、森永（2018）を参照した。厚岸で撮影した可視画像では、河口フロントなどに発生する渦構造(擾乱)の空間情報抽出を行うことにした。擾乱を伴うフロント形状を抽出するため、可視画像のRGB色空間からCIELuv色空間への変換を行い、主に明度を解析の対象とした。この変換を行うことで、明度分布を見れば二つの水塊の存在を確認することが可能となって、フロント形状を示すことができた。また、隣接画像間の明度の違いに対して、部分的な補正と全面的補正を施して比較を行った。結果として、この補正は、画像間の明度の差や撮影対象によって割合を変えることが適切だと考えられた。この処理を行うことにより、明度がより統一された合成画像の作成が可能になる。また、CIELuv色空間で大きな空間変化を示すフロント部分の抽出を行う勾配計算も行った。勾配計算を行うことによって、可視画像に写り込んでいた勾配の弱い海底の構造は除去され、強い勾配を持つフロントを強調した形で抽出することができた。さらに、ドローンを用いた可視画像から

得ることのできる情報として、構造の抽出だけではなく、可視画像の RGB 値そのものを海洋観測データとして利用できないか可能性を検討した。その中でも、RGB 値から河川水と海水の判別に CDOM（有色溶存有機物）とクロロフィル濃度の推定を R/B 値と B/G 値から求めることが可能であるか試した。R/B 値は有用性が十分に検証できなかったが、B/G 値は特に海底が写り込まない程度に水深がある水域では、有効に活用できると考えられた。以上のように、本研究では、沿岸海洋でドローン搭載の可視カメラを用いた超高解像度で広範囲の観測手法を提案した。なお観測方法や画像解析において複数の課題が見えたものの、問題点の改善やドローン性能の向上によって、可視画像を用いたドローン観測は、沿岸域の海洋観測の代表的手法に成り得ることが期待できる。

第1章 はじめに

1.1.研究背景

刻々と変化する沿岸域では、生態環境に影響を与える河川や地下水の沿岸域への流出過程や底層からの栄養塩供給などの影響を正確に把握するために、水温や塩分、クロロフィル濃度などについて、様々な時空間規模で観測や調査が行われている。沿岸域における海流に伴って移動する海洋生物の生態や、海流が沿岸気候に与える影響などについても観測が行われてきた。これらの観測は、例えば漁業や海運など社会的要請もあって、これまでも重要性が高く認識されてきた。

沿岸域を観測する手法の一つとして、リモートセンシングがある。リモートセンシングとは、観測対象に直接接触することなく可視光、赤外線、マイクロ波などを用いて対象物の形態や性質を測定する手法である。海洋におけるリモートセンシングを用いた2次元観測の代表的手法として、人工衛星センサーの利用が挙げられる。人工衛星を用いることにより、広範囲の水温場から藻場や干潟、サンゴ礁などの分布を解析することができ、また、松本(2016)によると、光学センサーを用いれば、太陽光の海面からの放射輝度を計測することで、水深を推定することも可能である。しかし、衛星観測は、1km以上の粗い空間分解能や、雲域の存在による頻繁な観測中断による時間分解能の影響もあり、全球観測には有効であっても沿岸観測には不十分な点もまだ多く存在する。

これまでの海洋リモートセンシングは、より低高度で沿岸海洋の諸現象を対象とする空撮技術として航空機や船舶曳航式のバルーンが利用されてきた。航空機を利用して、沿岸域で起きる比較的小規模の事象に対して、高度が数百 m 程度からの可視観測が実施されてきたが、持続的・継続的な観測を行うにはコスト面で欠点がある。一方で、船舶曳航式のバルーン観測では、1度ヘリウムを入れてしまえば、長時間飛行することが

可能である。例えば山本(2017)では、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、および方位角を利用することで海面での基準点（GPS受信機搭載のブイなど）を不要とするスタンドアローン化に成功した。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が限られてしまう。これでは、観測時間が大幅に掛かり、効率が非常に悪く、空撮画像に航跡が写ってしまうことも多い。さらに、広範囲をカバーするべく、カメラの角度を変えた斜めからの撮影を行うため、撮影後に画像の大きさを決定する必要があつて、加えて幾何補正に要する射影変換処理が全ての画像で必要となり、効率が悪い。

本研究では、災害地域における上空からの写真撮影や、人が立ち入れないような場所での保守点検や調査、物流業界における運送など、近年になって様々に活用される事例が急増しているドローンを用いた沿岸域のリモートセンシング手法の開発を試みる。これまでのドローンを用いた研究例として、森永（2018）では熱赤外カメラを搭載したドローンを用いて、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、約 400 m²の面積をカバーする海面水温（Sea Surface Temperature：以下 SST）観測に成功している。

本研究では、可視カメラを用いる手法を検証する。実際に海で発生している諸現象を調べる方法として、これまで人工衛星を用いた海色（クロロフィル量や CDOM に変換）観測は、水温・塩分・海面高度と同様に行われてきた。人工衛星と比べ時空間分解能がより優れた可視カメラ搭載のドローンを用いれば、海流は見た目からは判断が難しいが、河口から沖合に移る海色変化をトレーサーとして、時空間的に変動する水塊特性の観測ができるのではないかと考えた。そこで、人工衛星より低高度なリモートセンシング手法として、可視カメラのみ搭載したドローンを沿岸域の海洋観測へ導入することで、バル

ーン観測の際の欠点であった機動性や射影変換処理をせずに、低コストで1 km²の範囲かつ5cm程度の超高解像度で観測を行うことを目的とする。

1.2. 観測対象

春から秋の沿岸海洋では、海面加熱によって成層構造が発達する。浅海部の海域では、この成層構造が潮流と海底との摩擦によって生じた鉛直混合にくずされ、混合域となる。その結果、海面近くでは境界部を境にして、低水温の混合域と高水温の成層域に、明確に水塊の特性が分かれる。このような異水塊の境界部を海洋前線(海洋フロント)と呼び、特に夏季に潮流による鉛直混合に起因して形成されるフロントを、潮汐フロントと呼ぶ。また、陸水が川から海域へ流れ込んだ際に海水と混ざり合わず、海色が異なる境界を河口フロントと呼ぶ。このようなフロントは、河口域周辺で視覚的に観察することができる。フロントでは、成層域と混合域の境界には収束流が生じ、浮遊ごみや植物プランクトンが集積していることや、SSTや水塊が大きく異なることより、沿岸海洋において観測が比較的容易な海洋現象である。例えば森永(2018)は、フロントを挟んで大きく変わるSSTをドローン搭載の熱赤外カメラを用いて観測した。本研究では、視覚的にも容易に観察できる浮遊ごみやプランクトンに加え、海色の変化が大きいことが予想されるフロント周辺を可視カメラを用いて観測する。森永(2018)で使用した赤外カメラは約8万6千画素であったが、可視画像は有効画素数2000万画素と数オーダーも大きいため高解像度の画像が取得できる。加えて可視画像の利点は、同じ高度で撮影しても赤外カメラでは1度の飛行で400m×400mの範囲だった撮影範囲がより広範囲の720m×720mを撮影できることである。そこで観測で得た可視画像から、海色やフロントの構造などの空間情報の抽出を試みることにした。

第2章 手法

2.1. ドローン観測の概要

2.1.1. ドローン

ドローンとは、遠隔操縦ではなく、自動制御によって飛行可能な比較的小型な無人航空機を指す。ドローンの歴史について、ドローン専用ページ byPINTORU (<https://recreation.pintoru.com/dro-ne>) を参照しつつ以下に述べる。ドローンは新たな技術の象徴として、最近メディアに取り上げられる機会が増加しているが、最初は軍事用の無人航空機として開発された。第二次世界大戦中の 1944 年にアメリカ軍が開発した「BQ-7」という無人航空機が最初のドローンであり、この「BQ-7」は B-17 爆撃機を無人機に改造したもので、高性能炸薬を搭載して突撃することを目的として開発された。その後、莫大な予算と人的資源を投入することで軍事目的としてのドローンは実用化が進んでいたが、世界的に最近まで民間利用のドローンはあまり利用されていなかった。2010 年に「Parrot 社」が発表した「AR.Drone」が iPhone をコントローラとして使用できる簡単な操作性と、撮影した映像を iPhone で表示させる機能から大きな話題となり、世の中に広くドローンが認知されるようになった。また、ドローン普及のきっかけとして、スマートフォンやタブレット端末の普及や進化が大きく影響しており、ドローンに必要不可欠な「加速度センサー」「ジャイロセンサー」「GPS」などの小型の高性能センサーが多く搭載されていることから、これらの普及に伴って使用されているセンサーが大量に安く製造されることが後押しとしてあった。

軍事用として研究が開始されたドローンであるが、近年のドローンを取り巻く技術の急速な発展によりホビー用、商用、産業用といった用途で広く普及してきている。特に産業用ドローンは、GPS 自立制御、自動帰還、プログラム飛行の機能を用いて、大地震などの

震災の際には被災地の被災状況を空撮することで、より正確で迅速な状況把握を可能にしている。災害救助から、鉄塔やダム、電力設備、ビル壁面などの危険を伴う高所作業でのインフラ点検を行ったりするなど、様々な場面で活躍している。

海洋研究におけるドローン活用例として前田ら（2016）が行った赤潮観測などがあるが、まだまだ活用例は少ない。移動範囲がバルーン観測より広いとはいえ、まだ1km程度であること、撮影高度に対する法的制限、そして機体ごとに設定されている風速制限を考えると、観測計画や観測時の天候による制約がまだまだ大きく、ドローン観測を海洋観測手法の一つとして確立できるかは未知数である。それでも、近年急速に技術革新が進んだことによるドローンの長時間飛行、搭載カメラの多様化、操作性の向上を考えると、その活用が広まる可能性は十分にある。

2.1.2.本研究で使用したドローン

本研究で用いたドローン（DJI社製のPhantom4 Pro）を図2.1に示す。DJI社のPhantom4 Proのサイト（<https://www.dji.com/jp/phantom-4-pro>）を参照しつつスペックを以下に述べる。対角寸法が35cm、積載は不可で、飛行可能時間は約30分である。飛行可能距離は約6000mである。コントローラとドローン間の最大伝送距離は、障害物、電波干渉がない場合における最大伝送距離は4kmであるが、そもそも航空法において目視外飛行は禁止とされているため、飛行させる場合においては操縦者の見える範囲での飛行となる。Phantom4 Proは、5方向にある障害物を認識し、GPS受信がなくても障害物を回避しながら安定した飛行が可能な小型ドローンなため、操作性も良く、民間でも広く利用されている。本研究で使用したカメラはPhantom4 Proに付属するカメラである。より高解像度で撮影を行える空撮用に最適化された焦点距離24mm (35mm判換算)のF2.8広角レンズを搭載しているため、

画面の隅々まで歪みを抑えて、静止画や動画を撮影できるのが特徴である。また、1 インチ 2,000 万画素の CMOS センサーを搭載し、メカニカルシャッターと大口径単焦点レンズを使用しているため、高速飛行中に被写体を撮影しても映像が歪んでしまうローリングシャッター現象を回避できる。Phantom4 Pro は、DJI 社が提供しているアプリケーションソフト(DJI,Ground Station Pro[GS PRO])を用いて様々な飛行計画が設定可能である。



図 2.1 本研究で使用したドローン DJI 社製 Phantom4 Pro

2.1.3.自動飛行用アプリ DJI GS PRO

ドローンの飛行方法には手動飛行と自動飛行がある。今回の観測において陸地からの観測飛行では、離陸から観測撮影、着陸のすべてを自動飛行で行った。船上からの観測飛行では、観測中は自動飛行、離陸と着陸は手動飛行とした。自動飛行には DJI 社製の自動飛行用アプリケーションソフト DJI GS PRO を使用している。GS PRO は DJI の機体の自動飛行を制御または計画するように設計された iPad 用アプリケーションであり、飛行プログラムを設定できるのが特徴である。アプリケーション内で「フォトマップ」「バーチャルフェンス」「計測撮影領域モード」「計測撮影建物モード」「ウェイポイント飛行経路指定」といった 5 種類の自動飛行があるが、本研究では、主に「計測撮影領域モード」を用いて観測を行った。

図 2.2 に DJI GS PRO の操作画面を示し、その操作方法について箇条書きで記す。

《新規ミッション設定時》

1. アプリ DJI GO 4 を起動し、ドローンとの接続を確認し、安全確保する。
2. アプリ DJI GS Pro を起動する。
3. 新規ボタンを押し、新規ミッションを指定。(計測撮影領域モード)
4. 地図上指定を選択
5. 飛行領域を指定する。
 - i. 飛行距離の長さ：最大 5500m 前後に設定する。撮影地点との往復距離を考慮する必要がある。
 - ii. ポイント数：ホバリング撮影の時は、99 点以下《オーバーラップを変更することで調整可能》とする。
 - iii. 飛行予測時間：MAX30 分だが、条件により変わってくるため、安全を期して

23分前後を目安にする。

- iv. 飛行速度 : 等間隔時間、等間隔距離で空撮する場合は固定速度となる。
- v. 飛行高度 : 150m未満に設定する。150m以上は国土交通大臣の許可が必要である。

6. オーバーラップ率の調整を行う。最低経路間、経路上のオーバーラップはそれぞれ10%である。(詳細は2.3.2.を参照)
7. 撮影方法の決定:移動しながらまたはホバリングを撮影する度に行う、などを決める。
8. コースアングル&ミッション完了時の動作を決定する。
コースアングル(飛行させるドローンの進行角度)は同じ空撮範囲であっても角度によって飛行時間が大きく変わる。直角でないコースアングルを用いる場合は、可視画像を合成する際に回転処理が必要となる。
9. 飛行機マークをタップすることで設定したプログラムをドローンへ送信する。
10. 全てを確認後飛行。

《既存のミッションを飛行させる場合》

1. アプリ DJI GO 4 を起動し、ドローンとの接続を確認し、安全確保する。
2. アプリ DJI GS Pro を起動する。
3. 実行するミッションをタップ後、編集ボタンをタップする。
4. 設定済みのミッションを再度確認後、飛行機マークをタップする。
5. 全てを確認後飛行。

※ 1度飛行させたミッションを用いて、再度飛行することができないため、同じ内容のミッションをコピーして作成し、飛行する。

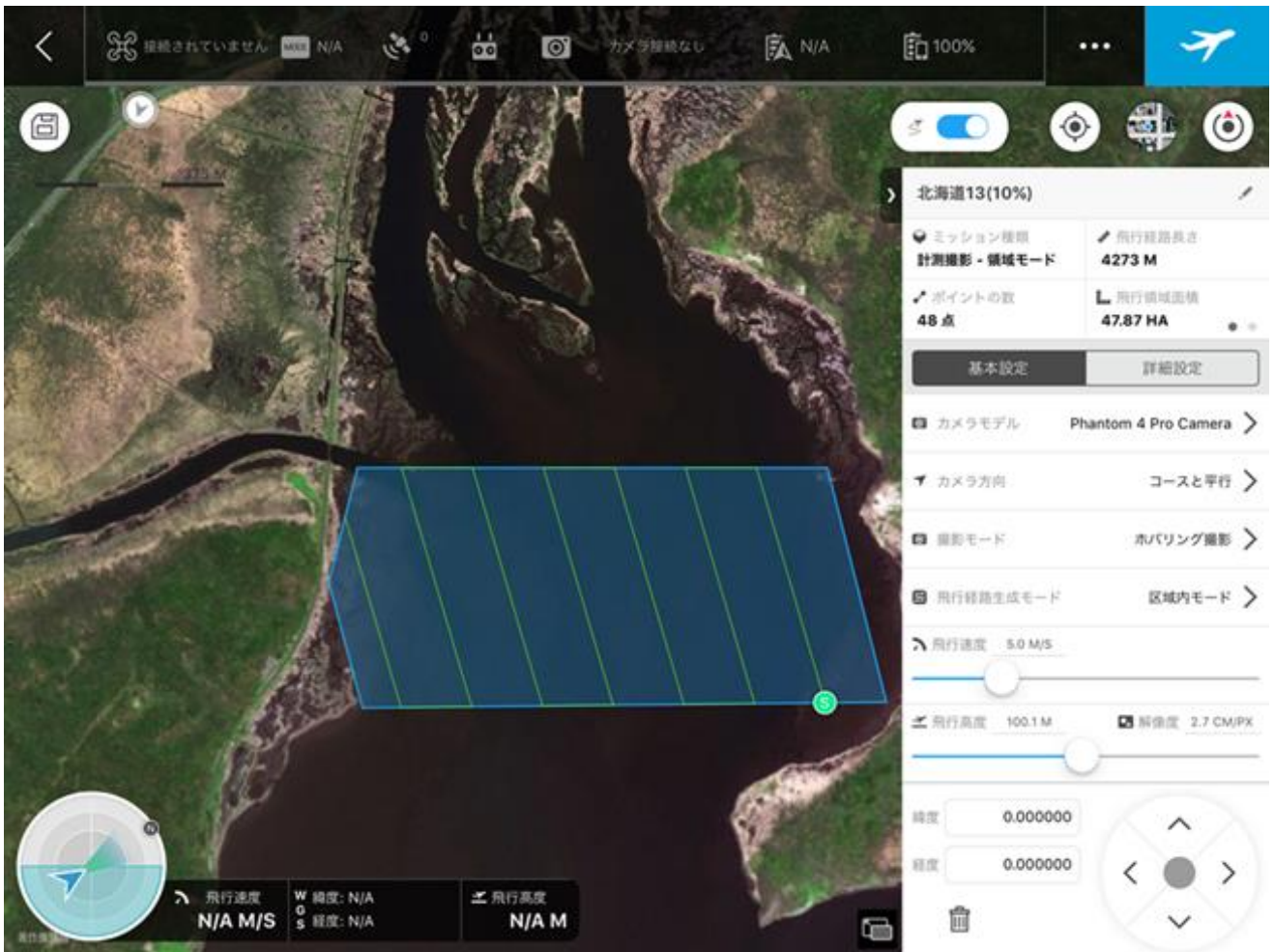


図 2.2 DJI GS PRO の操作画面

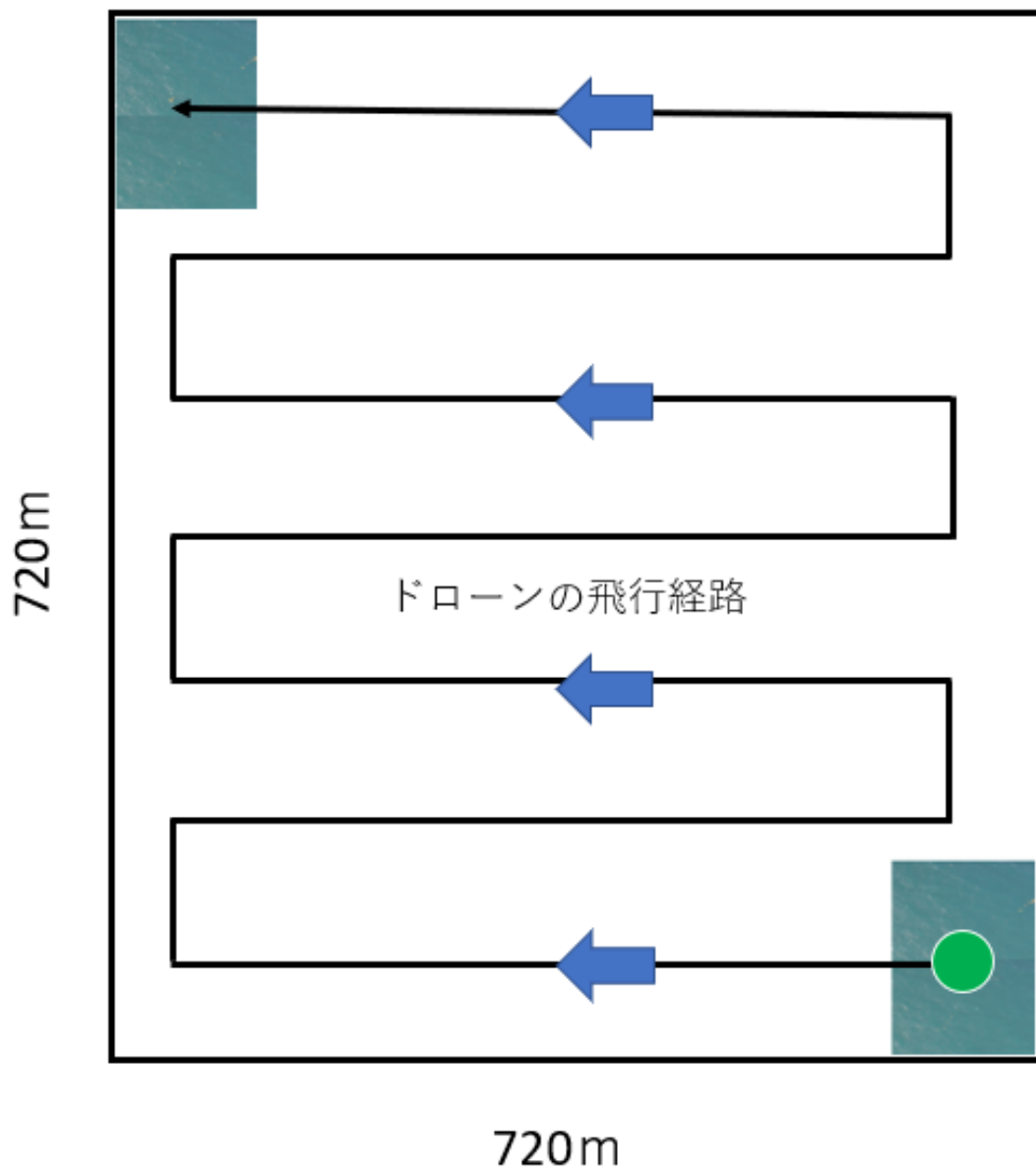
2.2.観測手法と実施内容

2.2.1.空撮手法

図 2.3 に GS PRO で作成した飛行経路の概略図を示している。右下の緑点から撮影を開始し、矢印の方向に移動しながらジグザグ上に飛行し撮影を行う。ドローンの飛行は 2.1.3. で述べたように専用のアプリケーション GS PRO を用いて制御する。本観測では、飛行高度 100 m、飛行速度 5 m/s、飛行経路上と飛行経路間の画像オーバーラップ率はともに 10% に設定する。また飛行中に、機体の方向は変わらず、撮影時はホバリングを行って撮影す

る。陸面の測量では精度を担保するため国交省基準でドローンの進行方向で 90%以上、隣接コース間で 60%のオーバーラップ率が推奨されている。画像を合成する際に画像の一致情報を活用するためである。しかし、海面の場合は、もとより撮影地の形状や彩度情報が時間変化するため、そもそも画像一致があまり期待できない。森永(2018)では、進行方向、隣接コース間のオーバーラップ率を 50%にしていた。本研究では、より広範囲を空撮するため、更にオーバーラップ率を低く設定した。高度 100 m で撮影された可視画像の期待される画像のサイズは約 150 m×100 m、解像度はそれぞれ約 2.5 cm/ピクセル (px) である。

本研究で実施する観測はドローンの飛行可能時間を離発着地点と観測開始終了位置を考慮し、一度の撮影範囲を約 720 m×720 m となるように設定した。可視画像には、撮影位置の位置情報が記録されるため、それをもとに全体の合成画像を作成する。陸上からの離着陸は全て自動操作で行うことができ、着陸時の帰還位置も GPS 座標で自動的・自律的に決定される。しかし、不安定かつ時事刻々と場所を変える船上からの離陸は、手で持ち上げた状態で飛行を開始し、また手動飛行で船上に戻し、図 2.4 のようにホバリングさせ機体を掴み強制停止させる方が確実である。



緑点 = 撮影スタート地点

図 2.3 飛行経路の概略図



図 2.4 ドローン離着陸方法

2.2.2.厚岸観測

2017年10月4日と5日の2日間に北海道の道東に位置する厚岸湖、厚岸湾、別寒辺牛川周辺で観測を行った（図 2.5）。この海域を選んだ理由は、図 2.6 のように、厚岸湖へ別寒辺牛川から流れる河川水の流出や厚岸湖と厚岸湾の間でおこる海峡を挟んだ水塊交換が観測できることが期待できるからである。また過去の観測(北海道大学・伊佐田准教授、私信)では、河川水と海水の間に大きな海色変化が確認されていた。事前に海色が大きく変化する場所かつ1回の飛行で撮影できる範囲をそれぞれ区画分けして空撮経路を設定した。

GS PRO で設定準備を前もって行うことで、現地で観測がすぐ実行できるようにした。多くの河口域では、都市に隣接していたり、近隣に空港や発電所があったりするため、航空法の規制によってドローンの飛翔が禁止されている場合が多いが、厚岸湖周辺は人工密度が低く、ドローン観測がしやすい利点があって、本研究では同水域を観測対象に選定した。

1 日目は、厚岸湖から厚岸湾で行われる水塊交換を観測するため、図 2.7 のように厚岸大橋周辺で観測を行う。厚岸大橋では海水と河川水が狭い範囲で水塊交換が起こることが想定され、現象を捉えやすいと考えた。また同日程で北海道大学低温研究所による海洋観測が実施されており、ドローン空撮の結果検証に活用できると考えた。比較的に住居の密集する地域であるため、落下等の事故防止の観点よりドローンの持続的な目視には細心の注意を払った。ドローンの飛行範囲を海上のみにした。2 日目は、別寒辺牛川周辺やアマモ域に焦点を当てて観測を行った。別寒辺牛川から厚岸湖への河川水の流出を狙って図 2.8 のような範囲で観測を行なった。アマモ域での観測は、アマモによって流れ場が変化することが指摘されており（長谷川ら 2011）、その周辺の水塊の特徴を捉えることを目的とした（図 2.9）。



図 2.5 北海道厚岸町位置

北海道全体における厚岸町位置（左図）、厚岸町における厚岸湖、厚岸湾位置（右図）



図 2.6 観測対象予定

赤丸：主な観測対象位置、青矢印：河川の流れ



図 2.7 厚岸大橋周辺観測予定地 (①～⑥は飛行予定区画)



図 2.8 別寒辺牛川から厚岸湖観測予定地 (⑦～⑭は飛行予定区画)

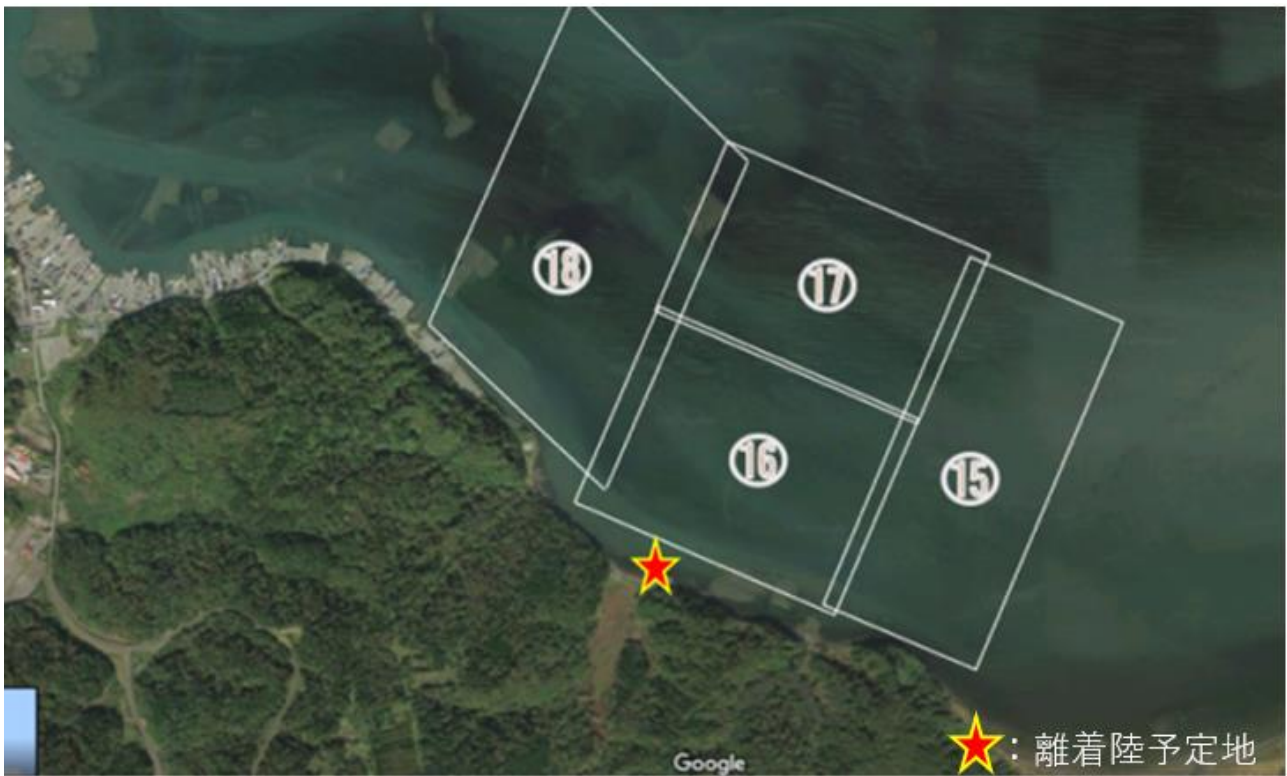


図 2.9 アマモ域観測予定地 (⑮～⑱は飛行予定区画)

2.2.3.瀬戸内海観測

ドローンを用いた前年観測(森永, 2018)は、小潮期に潮汐フロント周辺で実施したためフロント鮮鋭度が小さく、熱赤外面像に明瞭な空間変化を見出しにくかった。今回の観測では大潮期に合わせた 2018 年 9 月 11 日に、瀬戸内海の伊予灘(図 2.10)において愛媛大学沿岸海洋環境科学研究センター所有の観測船いさな(図 2.11)を使用して実施した。瀬戸内海を観測海域に選んだ理由は、内海で海が荒れづらく、また風の影響を受けづらいためである。本研究での瀬戸内海における観測目標は、沿岸域に時期を問わず存在する河口フロントである(直前までの荒天で潮汐フロントが形成されていなかった事情にもよる)。河口フロントを挟んでは海色差が特に大きいため、可視画像で明瞭なフロントが捉えられる期待が高い。また、厚岸に比べ、海底が深いため、海底が可視画像に写ることもない。観測目

的は河口フロントの形状を可視画像で精査すること、そして RGB 値からクロロフィル分布や CDOM 分布を推算することである。実際に目視で河口フロント周辺の収束域を確認し、その周辺でドローン搭載の可視カメラで空撮を実施した。なお、観測範囲に河口フロントを横断する方向で CTD 観測も行い海洋内部のフロント構造とともに水温・塩分・クロロフィル分布を測定した。

まず、観測海域周辺に移動し目視で河口フロントを確認する。次にドローンによる事前観測を行い、これによって大まかに取得したフロントの位置情報を利用し、河口フロントを挟むようにドローン空撮による観測範囲を決定する。事前に観測範囲が特定できた厚岸と異なり、潮汐フロントが観測できる海域の特定が難しいため、船上で観測範囲を決定する。潮流に流されて河口フロントの位置は常に移動するため、ドローンの飛行に支障がない限り広い観測範囲を設定する。観測範囲を決定したのち、図 2.12 に示すように、特定した二点に直交する形で CTD 観測線も決定した。河口フロントを挟んでの SST や塩分、クロロフィルを測定するために、潮汐フロントに沿った方向の観測をドローンで実施しつつ、同時に潮汐フロント横断方向の CTD 観測を同時に行った。



図 2.10 瀬戸内海の伊予灘観測予定地



図 2.11 観測線いさな（愛媛大学 CMES）

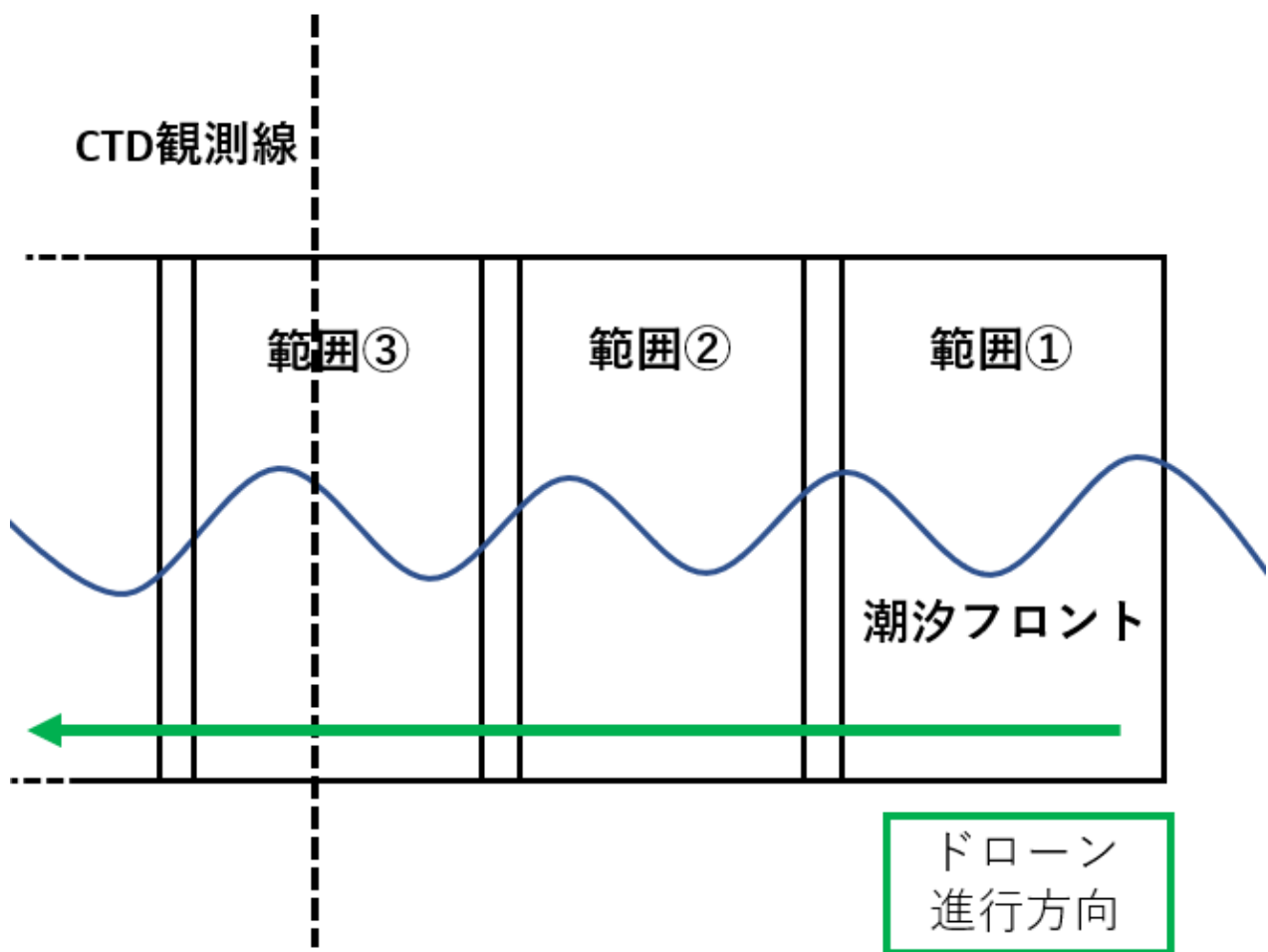


図 2.12 観測範囲全域の概略図

2.3. 撮影画像の合成

2.3.1. GPS 情報

撮影画像一枚で得られる面積には限界があるため、撮影画像を合成することで、より広範囲の面積をカバーした画像を作成した。合成方法として、森永（2018）が可視と赤外面像に行ったように、撮影位置の GPS 情報としてそれぞれの画像に記録された画像中心位置を原点とし、各撮影画像の位置を原点からの緯度・経度の差を利用して特定することで合成を行った。GPS 情報をもとに合成した画像である図 2.13 は、1 回の飛行観測で撮影した

46 枚を合成したものである。全体の範囲は 1100m×475m、解像度は 2.5cm/px である。観察で実際に写りこんだ泡や陸や影が空間的に連続していることから、ドローンが記録している GPS 情報を利用すれば十分な精度で合成ができることが確認できた。

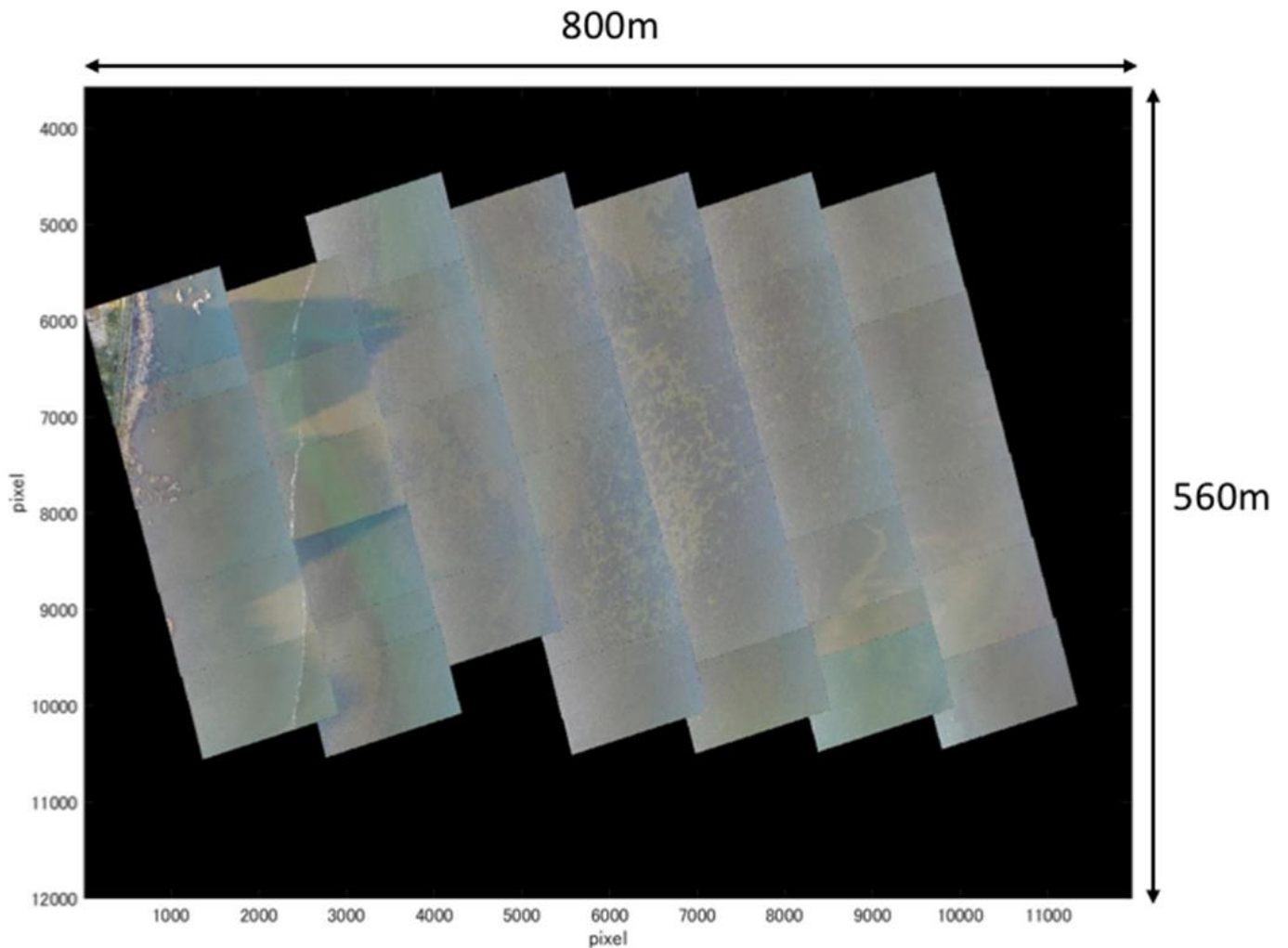


図 2.13 GPS 情報をもとにした全 46 枚の合成図 (図 2.8⑫地点)

画像上が北であり、別寒辺牛川が上から下の方向の厚岸湖へ流れている

2.3.2.オーバーラップ率

厚岸と瀬戸内海では、飛行経路上のオーバーラップ率（同一ラインで撮影される隣り合う可視画像の重ね合う面積と、一枚の画像面積の割合）、飛行経路間の画像オーバーラップ率（異なるラインで撮影される可視画像の重ね合う面積と、一枚の画像面積の割合）はともに10%に設定する。これは、2.2.1.で説明したように、海面の場合は、もとより撮影地の形状や彩度情報が時間変化するため、より広範囲を撮影するためオーバーラップ率を低く設定した。本研究で使用したアプリを利用するにあたっては、可視画像のオーバーラップ率を考慮して飛行経路を決定した。合成方法として、あらかじめ設定したオーバーラップ率とGPS情報をもとに画像間の距離を計算し、隣接する画像を合成していくことも可能である。図2.14はGPS情報とオーバーラップ率を考慮した合成の概略図となる。このような手法を用いた合成図とGPS情報のみを利用したものでは特に違いはない。

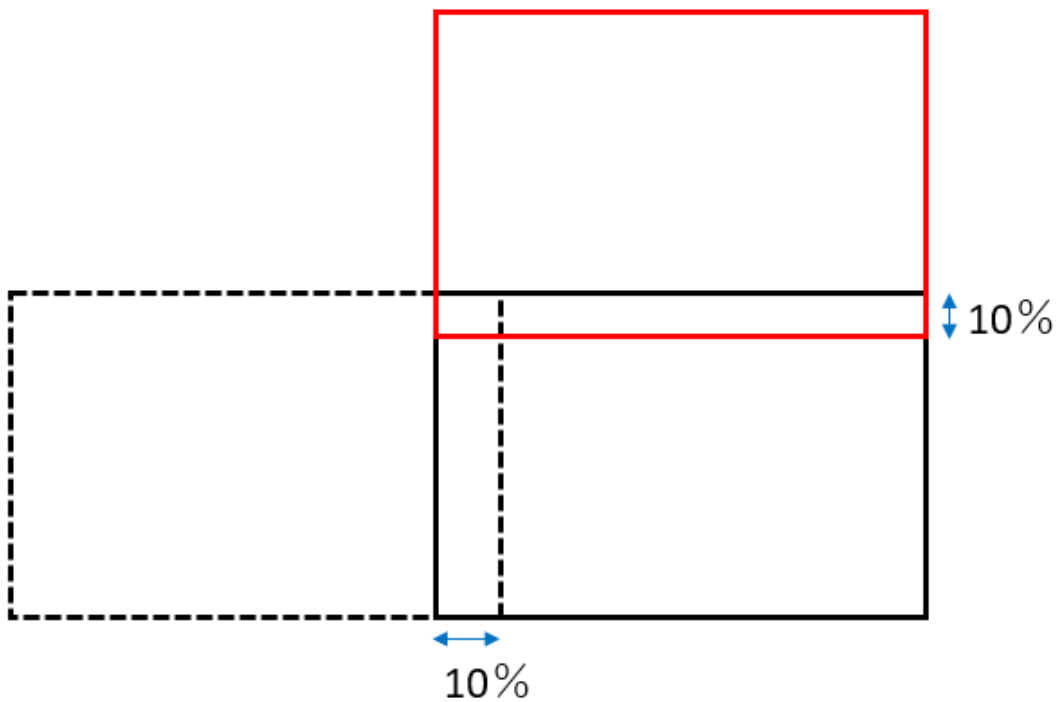


図 2.14 オーバーラップ率 10%のイメージ図

第3章 結果

3.1.観測の状況

本研究では、厚岸、瀬戸内海ともに概ね予定通りにドローン観測を実施することができた。厚岸湖周辺では、河川水の流出や海峡での水塊交換の一部を撮影することに成功した(図 3.1)。観測実施水域を図 3.2 に示す。まず、事前に GS PRO で設定した範囲で飛行可能か確認した。予定の離着陸位置が観測範囲外にある場合は、ドローンの一度の飛行時間にはバッテリーの容量に依存しているため、観測開始予定位置と離陸位置との距離、観測終了予定位置と着陸位置との距離を考慮する必要があることがわかり、観測区域を再設定した。図 2.7～図 2.9 のように合成画像にした際に、隣の観測区域とも重なるように区域の設定には注意が必要である。

1 日目は、午前厚岸湾周辺の 5 か所(図 2.7①、②、③、⑤、図 2.8⑦)、午後別寒辺牛川内の 1 か所(図 2.8⑭)で観測を行った。予定としていた図 2.7④、⑥は、想定していた離着陸地点で観測できなかったため、実施しなかった。また、小雨が降って観測が実施できなかった正午から午後 14 時過ぎまでは、2 日目の離着陸地点と観測区域との距離の再確認を行い、観測区域の再設定を行った(図 2.8⑭)。

2 日目は、午前アマモ域で 1 か所(図 2.9⑯)、午後から別寒辺牛川から河口付近で 5 か所(図 2.8⑧、⑨、⑩、⑫、⑬)、また予定していなかった厚岸湾で 3 か所(図 3.2⑰、⑱、⑲)観測を行った。厚岸湾で予定していなかった 3 か所は、陸上から顕著な海色変化が期待できると推定されたため観測を行った。別寒辺牛川から河口付近で観測を行う予定であった図 2.8⑪は飛行できなかったが、その他の予定地では予定通り観測を行うことができた。

瀬戸内海では、予定では潮汐フロントを観測対象としていたが、荒天によって明瞭な潮

汐フロントが形成されておらず、また前日の大雨の影響から河口フロントが明瞭であったため、今回の観測では河口フロントを観測対象とした。観測手順としては潮汐フロントを対象にしたものと変更なく計画通り進めることができ、図 3.3 のように明瞭な海色変化が観察された肱川の河口フロントを、北緯 33 度 32 分 5.66 秒，東経 132 度 21 分 47.66 秒の地点において撮影することに成功した。また、河口フロントを挟んだ図 3.4 の地点で CTD 観測を 6.8km に渡って 10 点で行った。

概ね、予定した手順に沿って進めることができたが、それぞれの地点において問題点が幾つか抽出された。詳細については考察で述べるが、主な問題点は、厚岸での観測は 2 日間にわけて行ったため、1 日目と 2 日目の天候が異なったことである。1 日目の天候は、曇り時々雨の天候で、2 日目の天候は晴れであった。周辺域を合成する場合は、できる限り同じ天候での撮影が撮影後の画像解析において適切であることがわかった。次に瀬戸内海での観測では、撮影をはじめ肱川側から撮影を開始したが、予想以上にフロントの移動が速かったため、設定した観測区域に収まらず、フロントが合成画像に写らない場合があった。移動速度の速い観測対象に対しては、移動方向を事前に推定し、「風下」側（移動してくる側）から観測を始めることで、確実にフロントが観測区域に収まるようにプログラムの設定をアプリ内で行う必要がある。



図 3.1 ドローンから撮影した厚岸湖（手前）と別寒辺牛川（奥）



図 3.2 観測実施地

(各地点の合成画像は付録に添付)



図 3.3 瀬戸内海の河口フロント



図 3.4 CTD 観測位置

3.2.撮影した可視画像

厚岸と瀬戸内海の観測地点で撮影した画像の面積は、縦横それぞれ約 100 m×150 m で解像度は 2.5 cm/ピクセル (px) であった。この画像を合成することで、観測区域全体の画像となる。

図 3.5 に厚岸で撮影したポイントごとの海色の違いを示す。アマモ域では人工物である牡蠣棚が写りこみ黄土色で、厚岸湾では濃い青色、厚岸湖ではややくすんだ灰色がかった緑色、河口では白っぽい青色など、アマモ域、厚岸湾、厚岸湖、河口、河川内と顕著に海色の違いが撮影できた。また図 3.6 は、16 時ごろの満潮時に別寒辺牛川内で撮影した画像である。画像の上が上流となっており、上から下の方向の厚岸湖へ川は流れている。この画像 1 枚からでも河川内で色の境界や海底、地形から起こる泡の発生が捉えられている。この 1 枚からでも、ドローン搭載の可視カメラで海色変化を観測することができ、水塊構造を推察することは可能であることがわかる。しかしながら、画像だけでは境界を挟みどちらが海水か河川水であるかは判然しない。

図 3.7 は瀬戸内海の肱川河口で撮影した可視画像である。このフロントでは観測船いさなの水温計で、フロントを挟んだ水温差が 1℃以上の差がある河口フロントであることがわかり、可視画像からも明確な海色の違いを確認することができた。

以上のことから、可視画像から、海色変化を観測することができ、水塊の水平構造を捉えることが可能であると考えられた。そこで、観測で得た可視画像を用いて、厚岸ではフロントの空間構造の抽出と可視画像に基づいた海色の値の空間分布、瀬戸内海においては可視画像に基づいた海色の値の空間分布を検証した。

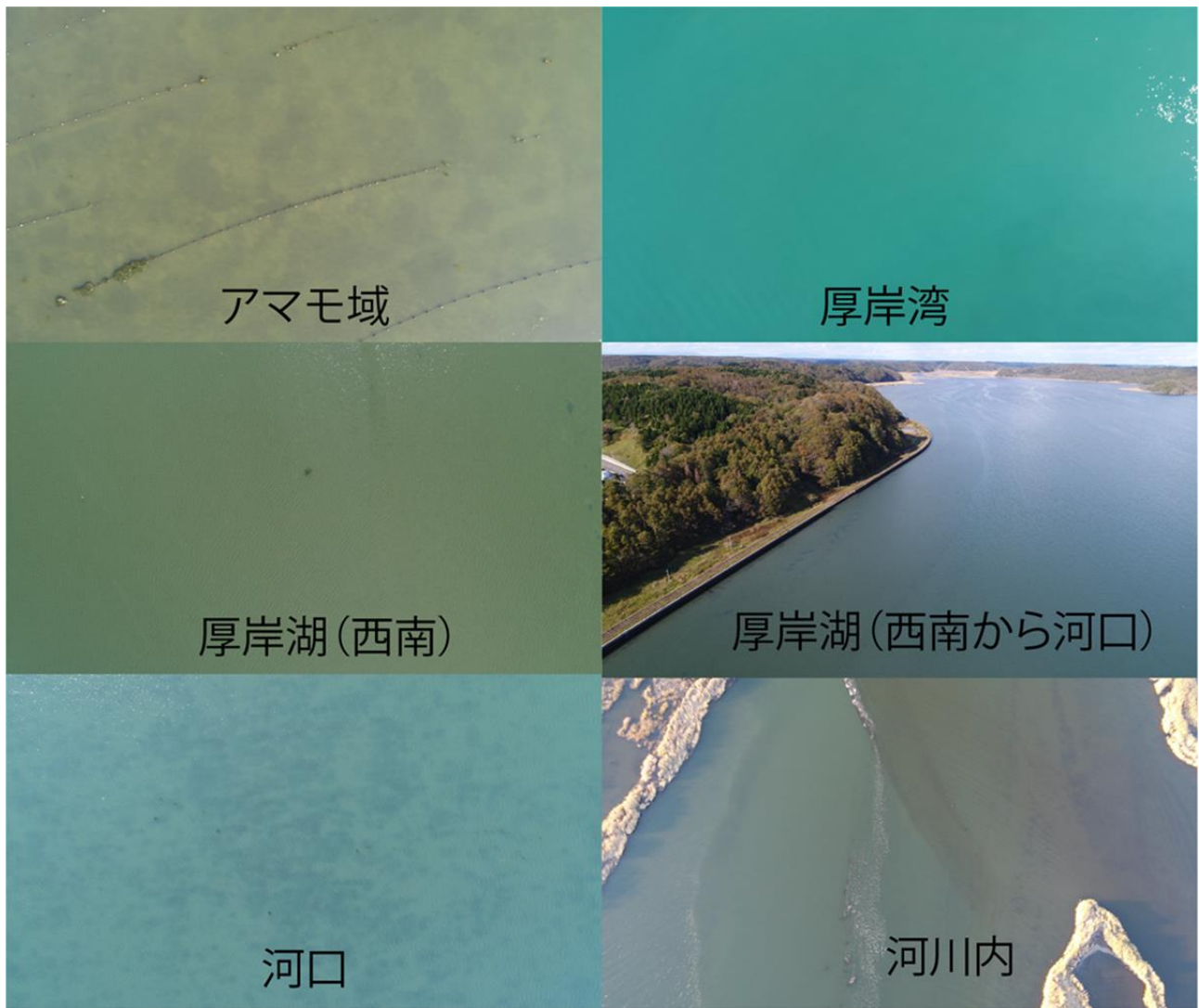


図 3.5 撮影ポイントによる海色の違い

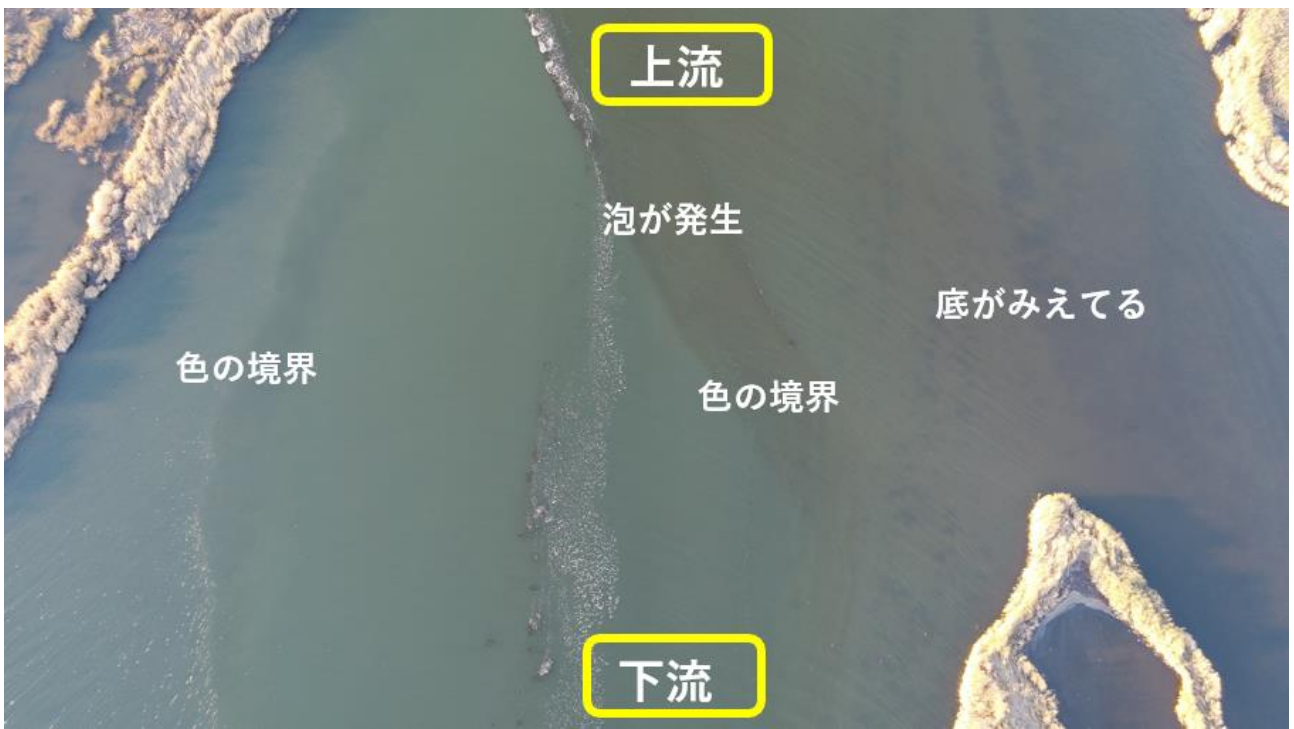


図 3.6 河川内で撮影した可視画像

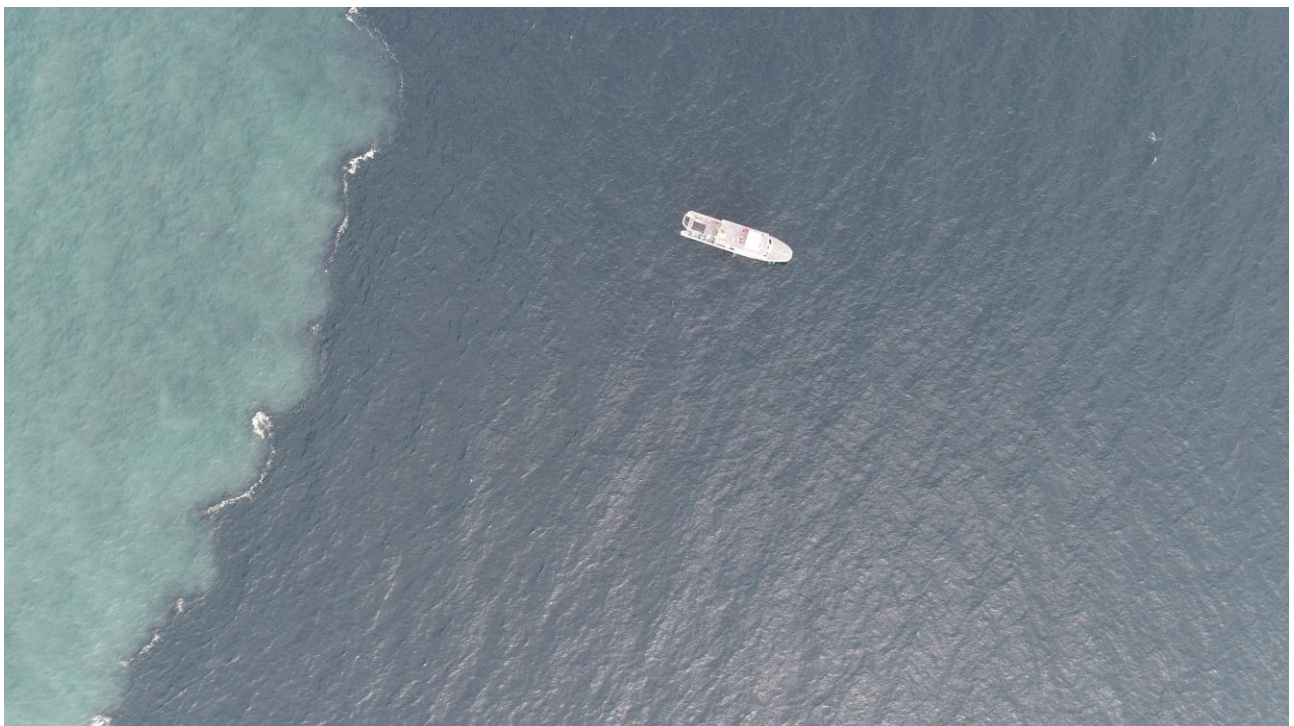


図 3.7 瀬戸内海で撮影した可視画像

3.3.画像解析

3.3.1. 渦構造などの空間情報の抽出

図 3.8 は厚岸湾の図 3.2⑱で撮影した 31 枚の合成画像である。その中で、赤枠の河口フロントの写り込んでいる 150m×100mの箇所図 3.9 に着目し解析を進めることとした。

まずは、フロント形状を抽出する方法として RGB 値から CIELuv 色空間への変換を行った。CIELuv 色空間に変換した理由は、合成を行う際に重ね合わさった部分における値を求める際、RGB 値では色の変化が非線形な色空間のため平均値を求める、といった解析手法が使えないためである。例えば RGB 値が 100 の画像と 160 の画像で平均を取る場合でも、線形変化をしないため RGB 値が 130 の画像を表示するわけではない。一方、CIELuv 色空間は色の変化が線形な色空間のため、画像同士の重ね合わせの計算を行いやすい。また、RGB 色空間に比べ CIELuv 色空間では明度が明確なためである。

CIELuv 変換を行い求めた明度の空間分布を図 3.10 に示す。明度のみを表した画像においても画像内の二つの水塊の存在を明瞭に確認することができ、フロントの位置の検出が可能であることが示唆された。

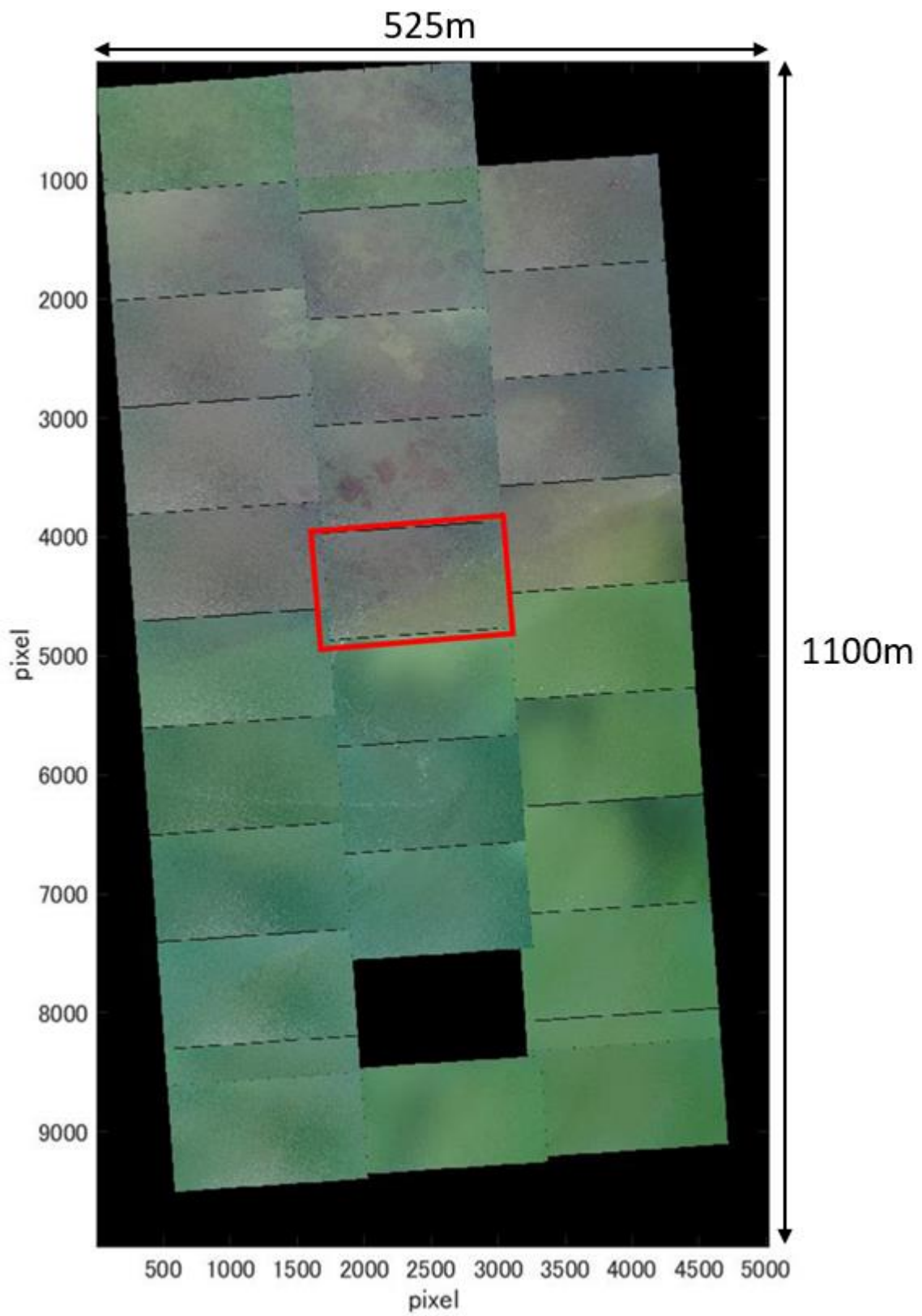


図 3.8 厚岸湾で撮影した 31 枚の合成画像 (図 3.2⑱)



図 3.9 厚岸湾で撮影した可視画像

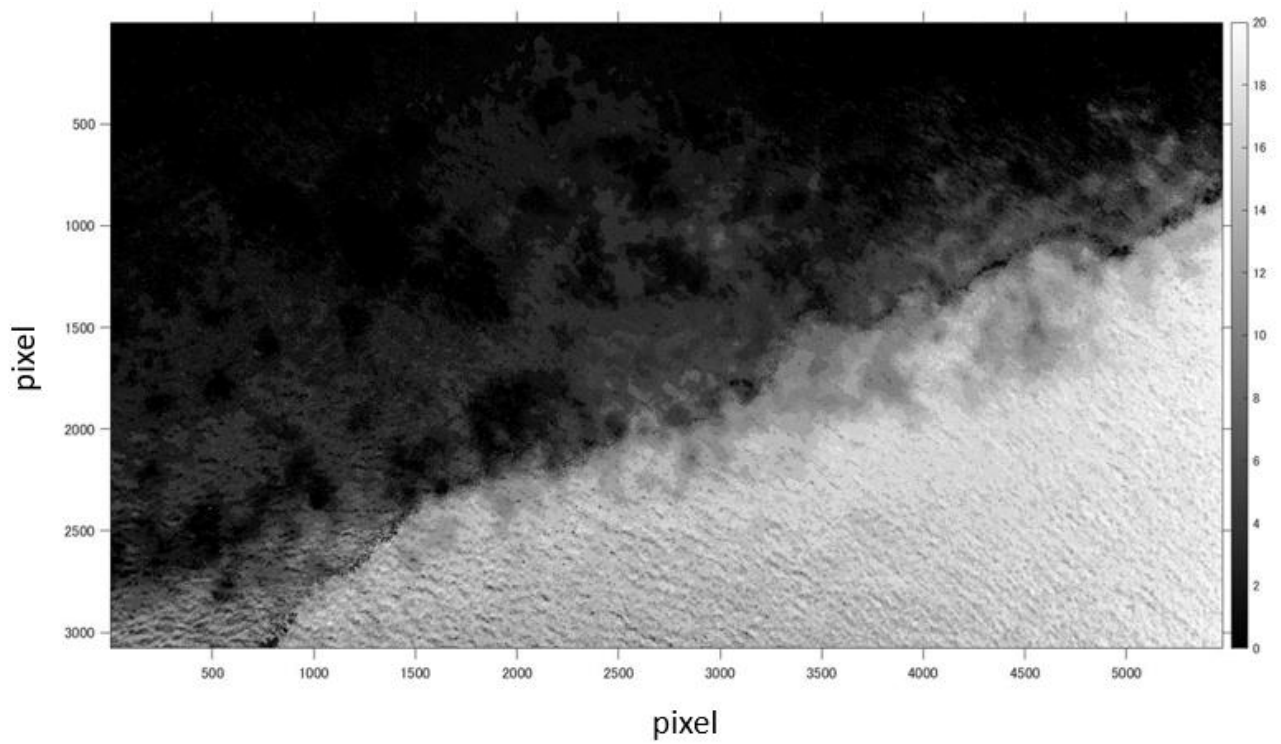


図 3.10 図 3.9 の RGB 値を CIELuv 色空間に変換後の明度 L

3.3.1.1. 部分的平均値補正

図 3.11 は図 3.9 の画像と隣接する観測地点におけるもう一枚の画像との合成をしたものである。図 23 のように 1 枚の可視画像においては分からないが、隣接する画像と合成する際には画像間で明度の違いが存在することが推定される。そこでまず、3.3.1 で述べた CIELuv 色空間への変換処理をそれぞれの画像で行い 2 枚の間にある明度の差を確認することにした。図 3.11 に CIELuv 色空間に変換処理を行った 2 枚の画像を図 3.12 に示す。図 3.12 において画像間の境目に対して確かに明度の差が存在することが確認できた。

そこで、画像間の境目に対する明度の差をなくした合成画像の作成を試みた。図 3.13 のように画像①、画像②が隣接する境界付近の領域をそれぞれ③、④とする。画像①で重なっている領域③の平均明度を $L_{③}$ 、画像②の重なっている領域④の平均明度 $L_{④}$ 、とする。領域③と④の平均明度を同じにするには領域①の平均明度を次式のように変化させる必要がある。

$$L_{AVE} = L_{④} - L_{③}$$

この L_{AVE} を領域①の画像に対して次式のように補正することで、

$$L_{①'} = L_{①} + L_{AVE}$$

領域①'の明度と領域②の明度は境界領域で隣り合う領域で明度が同じとなり、このことにより画像間の明度の違いが除去できると考えた。

③の領域が①の画像のうち占める割合を 25%と 100%のケースにおける補正を行った。図 3.14 は 25%、図 3.15 は 100%の③の領域で補正をかけた図である（ディスプレイで見るとより明瞭である）。100%の領域割合を仮定して補正をかけてしまうと画像内の明度が高い部分に引っ張られて全体的に明るくなってしまい、フロントの境界部分が薄くなってしまった。つまり、この明度調整は重なる明度の差や残しておきたい対象によって割合を

変えることが適切だと思われる。ただ、明度処理を行うことで、図 3.12 と比較し、全体と明度がより統一された合成画像の作成ができ、フロントの連続性が改善された。

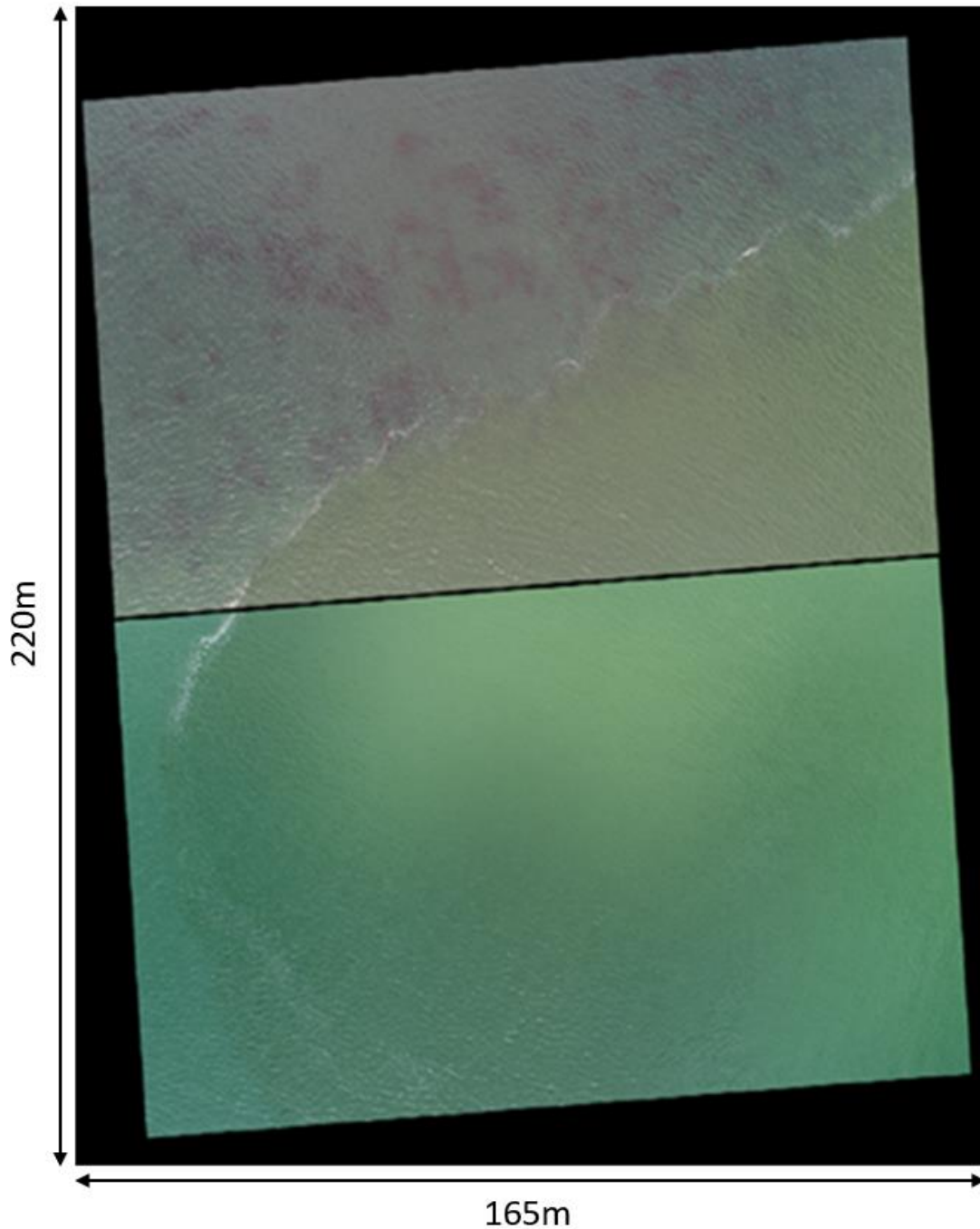


図 3.11 隣接する画像での明度の違い

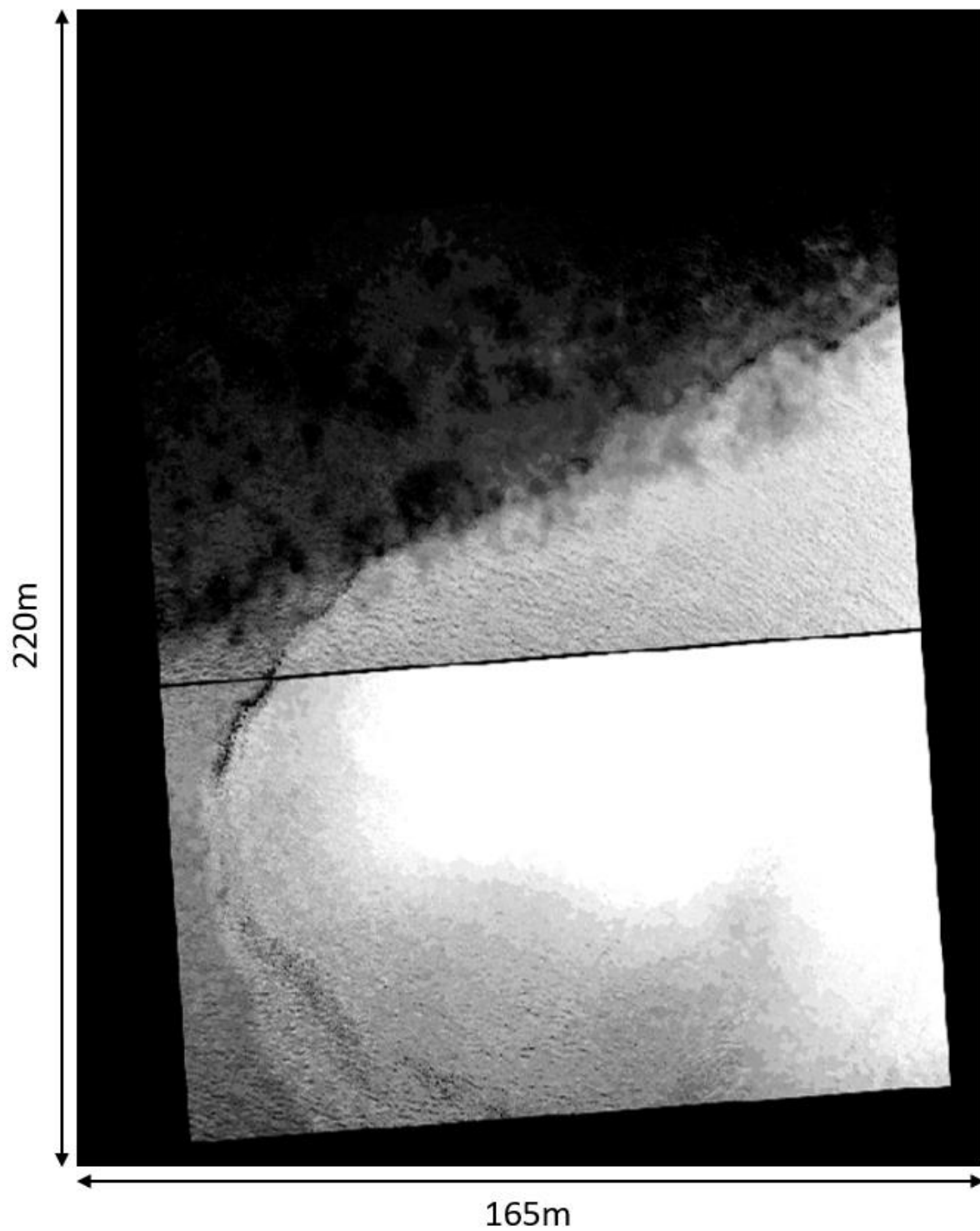


図 3.12 図 3.11 の RGB 値を CIELuv 色空間に変換処理のみ

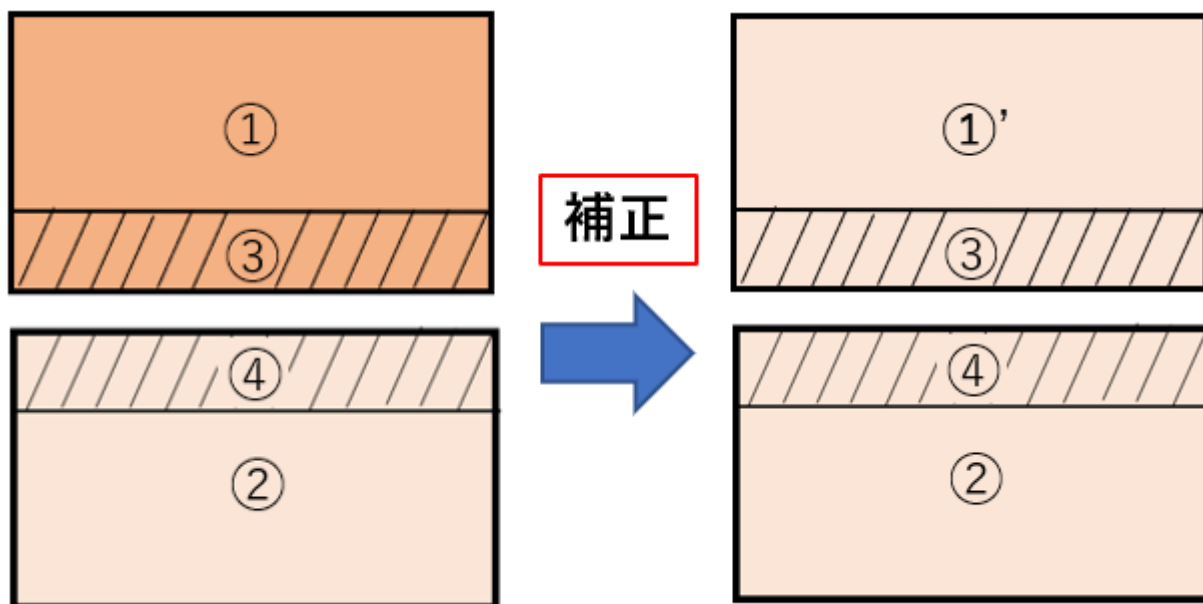


図 3.13 部分的平均値補正の説明図

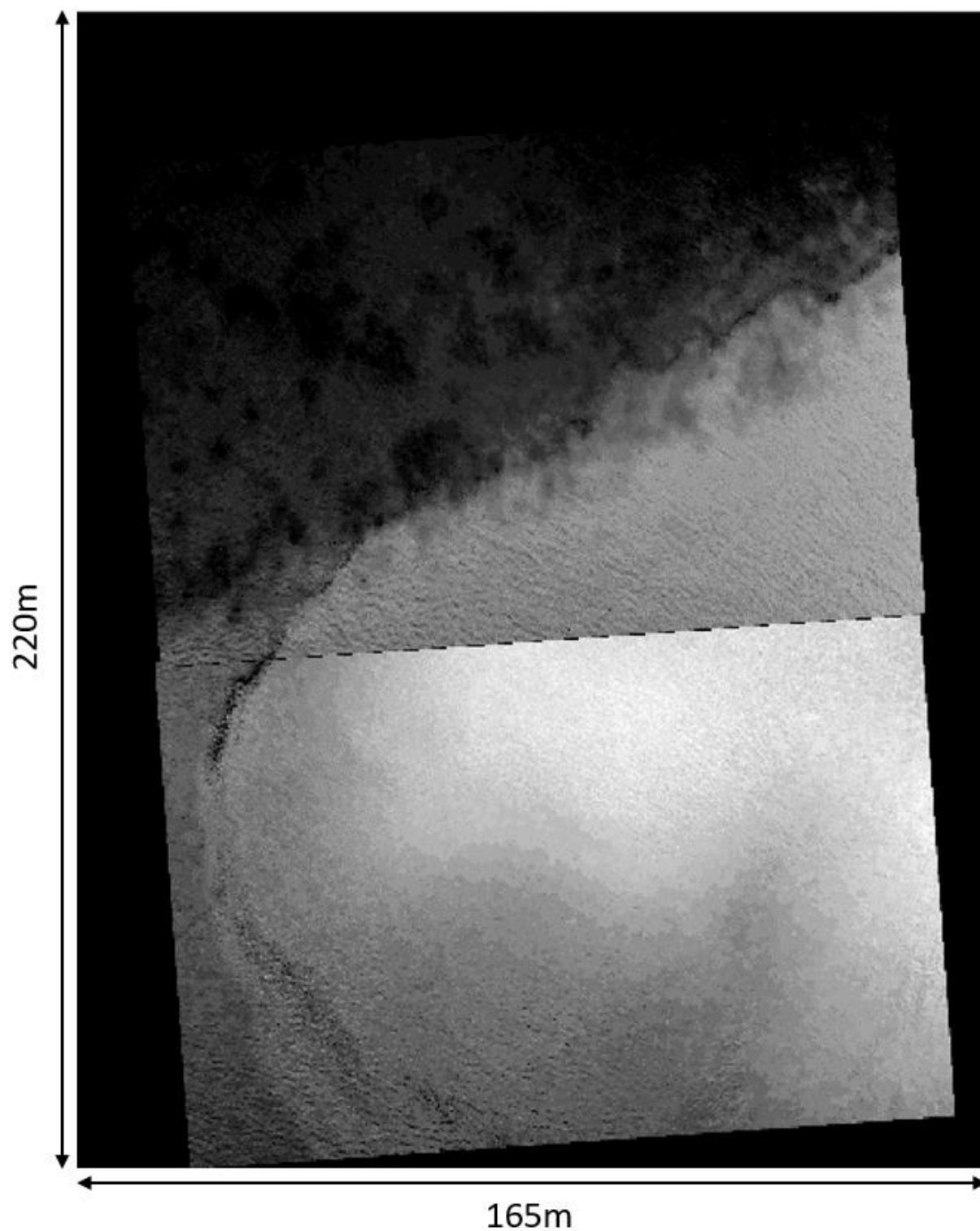


図 3.14 CIELuv 色空間に変換処理+25%部分的平均値補正

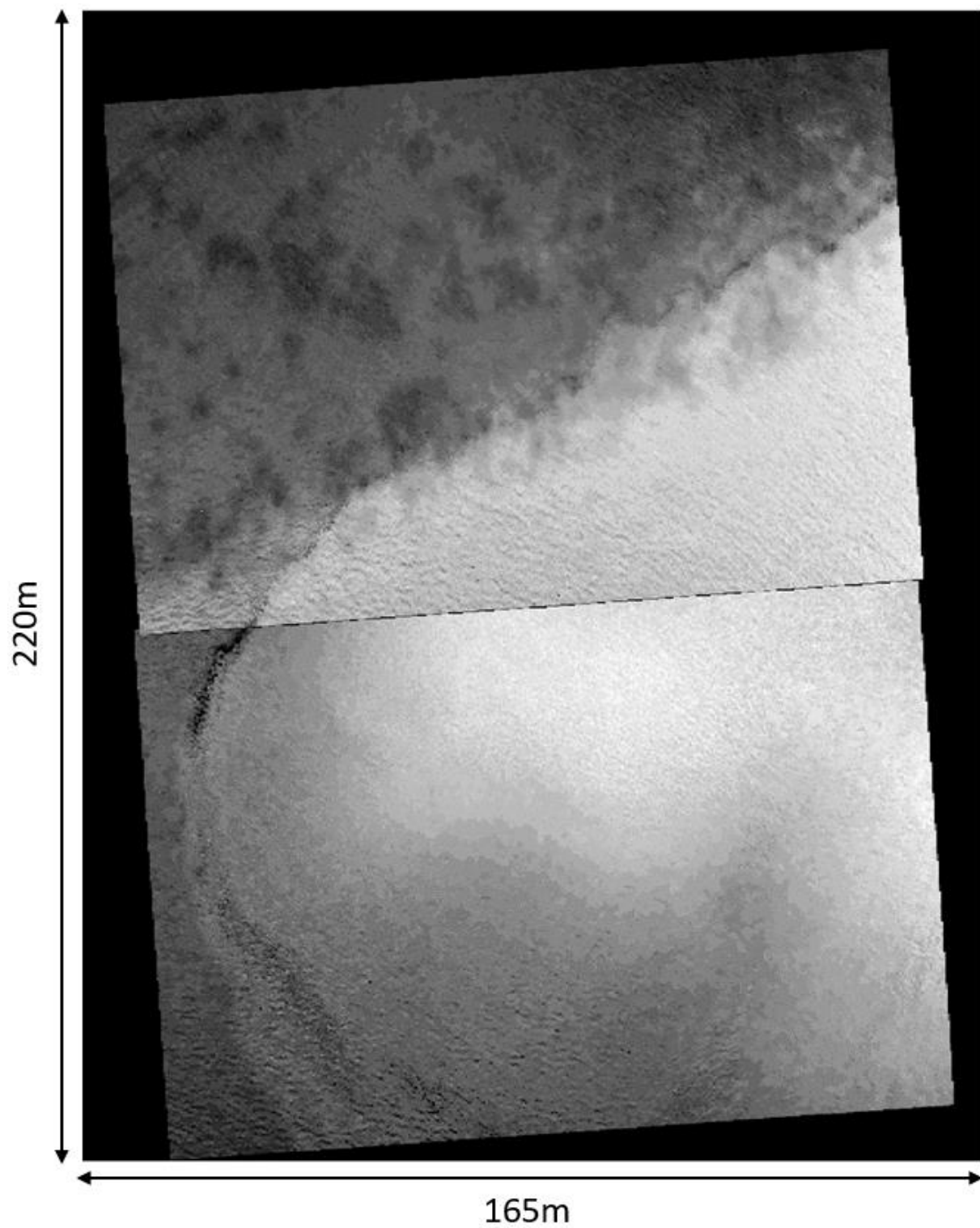


図 3.15 CIELuv 色空間に変換処理+100%部分的平均値補正

3.3.1.2. CIELuv 色空間での勾配計算

3.3.1.1.では CIELuv 色空間を用いて明度に基づいたフロントを挟んだ河川水と海水の海色の違いを検証したが、さらに勾配を見積もることで、急に海色が変わるフロント部分の空間構造抽出を試みた。勾配を見積もる前に図 3.16 のような正方行列を用いて、空間平均フィルターを行なった。このフィルターを用いることで、ピクセルスケールの画像変化が作り出す空間勾配を除去し、より大きいスケールの変化を捉えることを目的とした勾配計算ができるようにするためである。勾配計算を $A(i,j)$ とし、勾配計算を行う元画像を $B(i,j)$ とすると勾配計算 A は、次のように表すことができる。

$$A(i,j) = \sqrt{\{B(i,j+1) - B(i,j)\}^2 + \{B(i+1,j) - B(i,j)\}^2}$$

(i,j) は、ピクセルの x 座標、 y 座標である。勾配を求めることで図 3.9 で写り込んでいた勾配の弱い海底の空間構造が目立たなくなる一方、強い勾配を持つ約 20m 規模で変動するフロントが強調された画像を抽出することが出来た。

図 3.18 は図 3.8 と同じ領域である全合成画像である。2 枚の画像で確認したように、フロントに重なる渦構造(擾乱)などの微細な空間情報の抽出に成功した。しかし、図 3.18 では、1 枚 1 枚をよく見ると画像の左下に強めの勾配値が存在することが分かった。この強い勾配が出ている箇所の可視画像を見てみると、太陽光の反射によることが分かり、この口径食の存在によって勾配処理にバイアスが生じてしまうことが判明した。そのため、勾配計算は口径食を除去後に行うことが望ましいことが分かった。

鮮鋭な空間勾配を持つフロントに対し、穏やかな色調の変化をもつ海底の空間構造は、勾配計算を行うことで、自然とその存在が画像から取り除かれた。では陸と海の違いが存在する画像に対しても勾配計算は有効なのかを検証するため、図 3.19 の河川内で撮影した合成画像に対し、図 3.20 のように勾配計算を行った。図 3.19 の左下に写っている河川内の

地形から発生している泡列の構造が確かに抽出できていることが分かる。陸地が写りやすい河川内での画像解析において有効であることがわかった。一方、陸地や河川内の植生に対しても海色の勾配が大きくなっていることから、陸域の画像に対しては海底のように自然と取り除かれることがない。

1	2	1
2	3	2
1	2	1

$$Filter = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 3 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} / 15$$

図 3.16 平均化フィルター

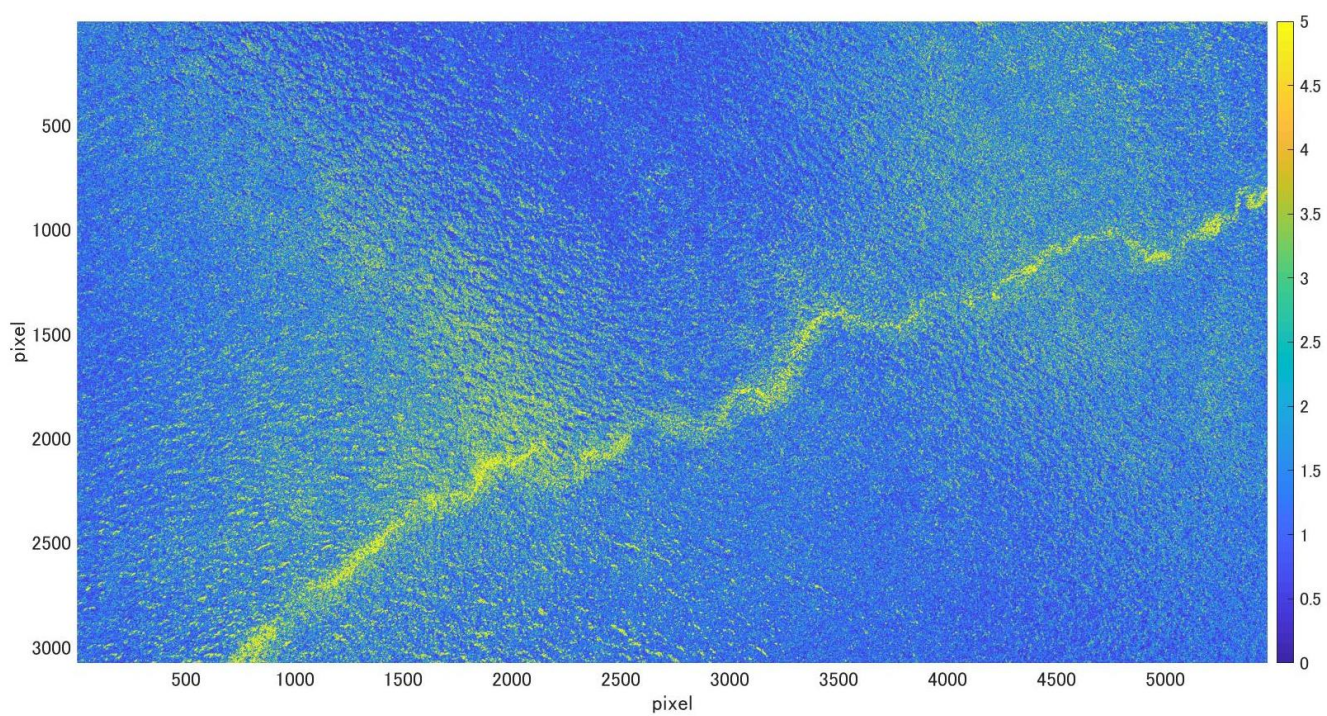


図 3.17 図 3.9 に対する CIELuv 色空間に変換処理+勾配計算

【フロント】 波長：約 22m、振幅：約 4m

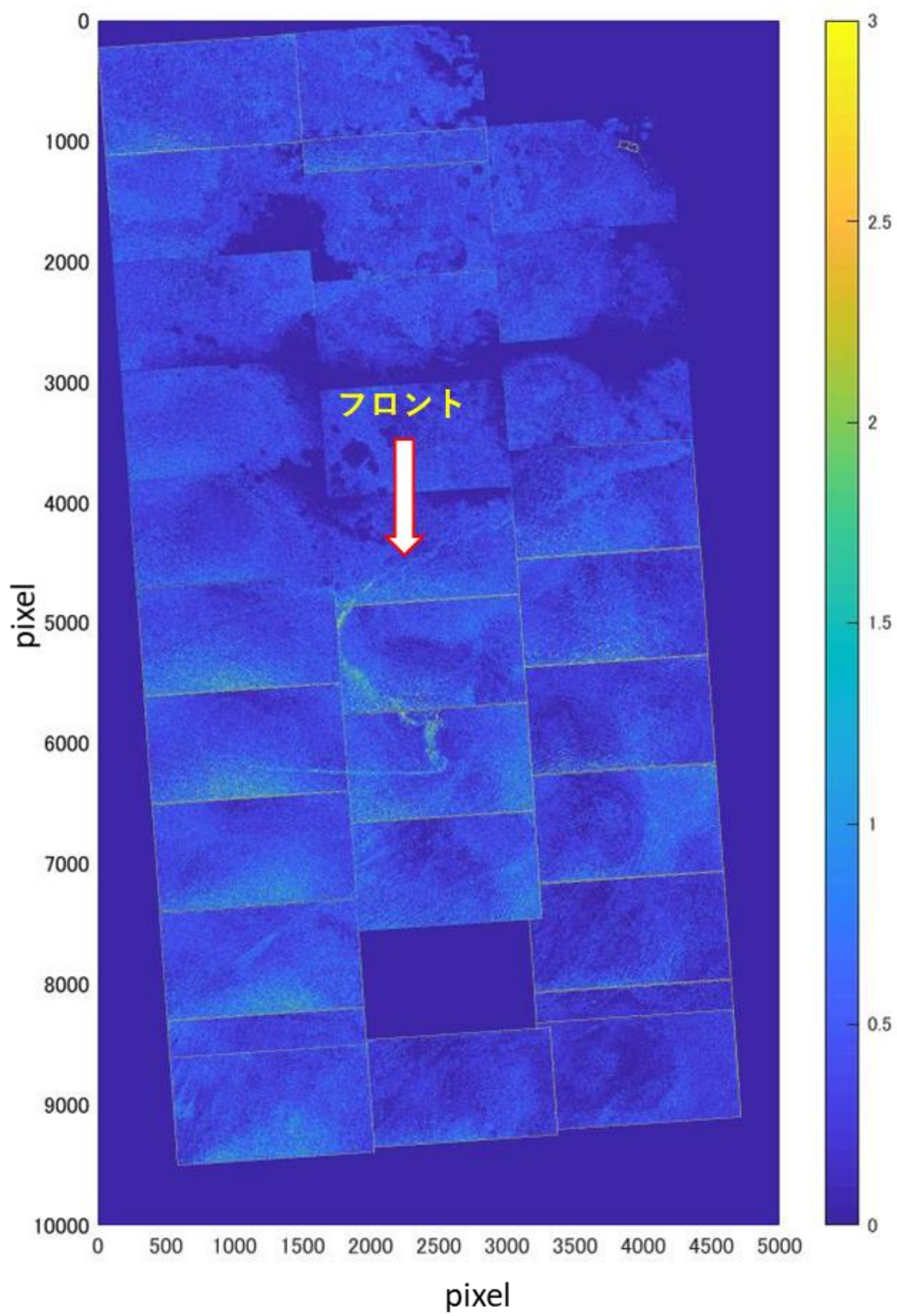


図 3.18 図 3.8 に CIELuv 色空間に変換処理+勾配計算

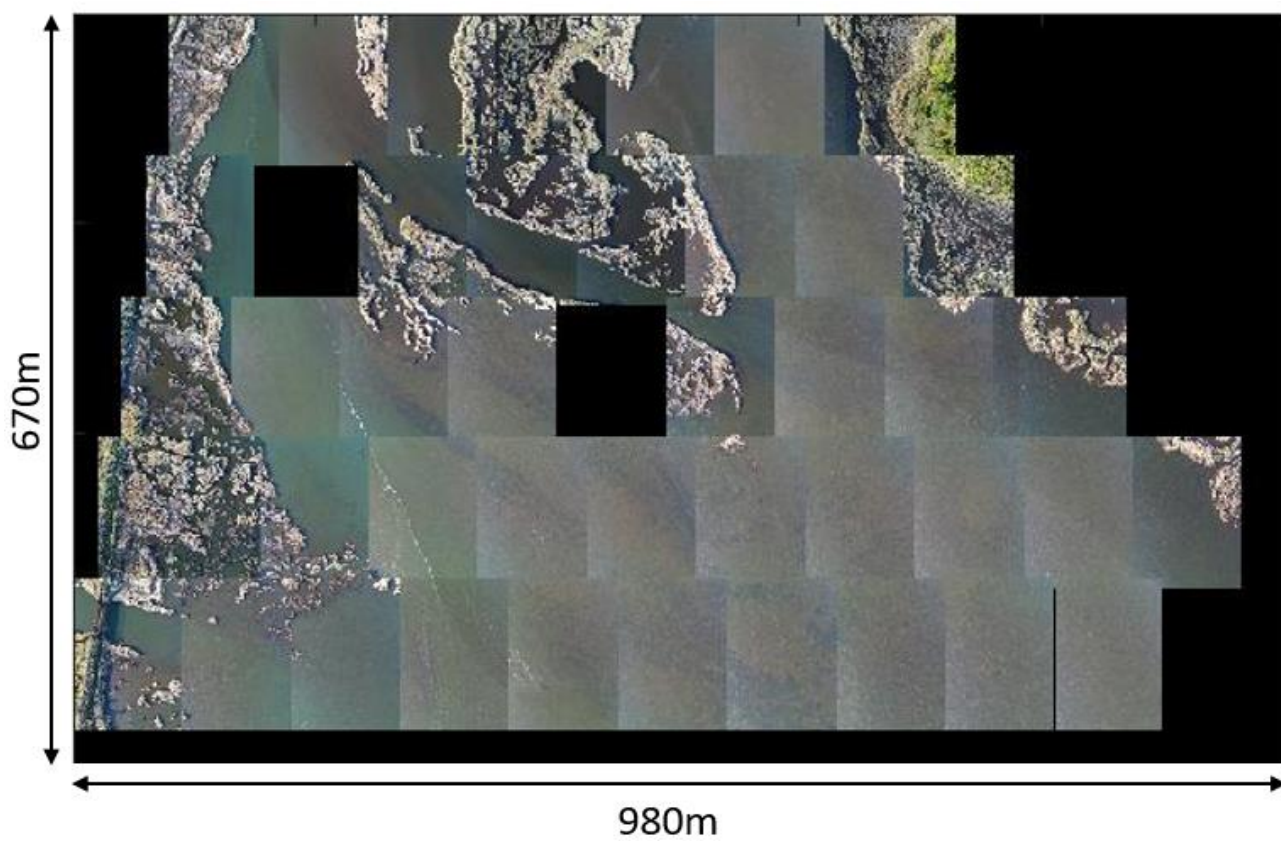


図 3.19 河川内撮影の合成画像

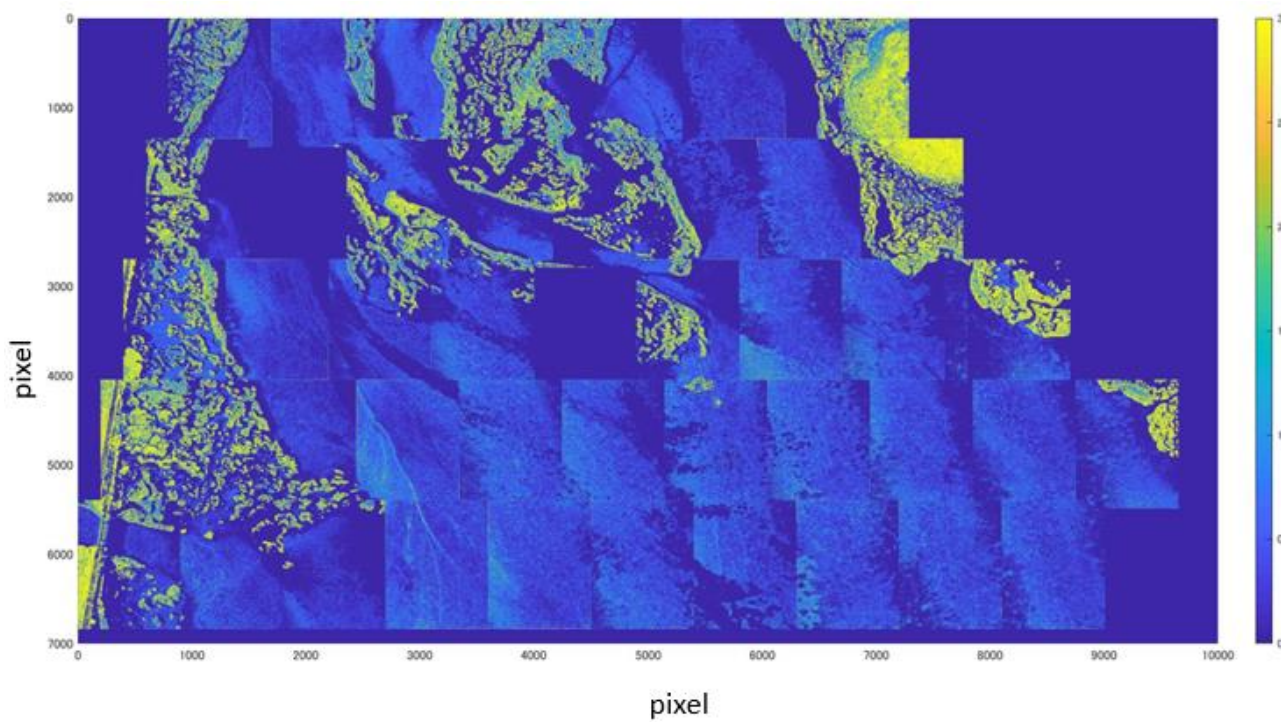


図 3.20 図 3.19 に CIELuv 色空間に変換処理+勾配計算

3.3.2. 河川水と海水の判別方法

ドローンを用いた可視画像から得られる情報は、明度に基づいたフロントの空間構造の抽出だけではない。そこで、RGB 値を利用した衛星観測の手法がドローンの可視画像に対しても有効かどうか検討した。その中でも、河川水と海水の判別に頻繁に用いられる CDOM（有色溶存有機物）とクロロフィル濃度を推定にドローン観測から得られた RGB 値を用いて見積もることが可能かどうかを試した。Godijn and White(2005)によると、RGB 値から求めた R/B 値が CDOM、B/G 値がクロロフィル濃度を表すと述べている。海域によるが、一般的に CDOM は、河川で高く海水で低い値となることが多い。また、クロロフィル濃度は、河川で低く海水で高い値となることが多い。

R/B 値と B/G 値を図 3.11 の画像から求めたものがそれぞれ図 3.21、図 3.22 である。図 3.21 の R/B 値では、全体的に高い値となって、フロントで河川水と海水の境界の判別が難しくなってしまった。しかし、図 3.22 の B/G 値ではフロントを境目として河川水である部分では小さい値となり、海水においては高い値となっている。可視画像でも十分にクロロフィル濃度の指標として活用できているのではないかと思われる。

図 3.23、図 3.24 は図 3.19 の河川内で撮影した合成画像に RGB 値をもとに R/B 値と B/G 値を求めたものである。R/B 値は全体的に高い値となり適用できている可能性があるが、一部低い値となっている箇所もあり水塊の特徴を捉えられたのか疑問となる合成画像となった。また、河川内で撮影したものであるため B/G 値は小さい値にならないといけなが、全体的に高い値となっている。これは海底が写ってしまったことにより、海底の泥が RGB 値に影響を与えていることが原因だと考えられる。そのため、海底の写っていない瀬戸内海観測の合成画像である図 3.25 から R/B 値と B/G 値を求めた画像に海底の影響が R/B 値と B/G 値に出ているのか検証した（図 3.26）。図 3.25 の瀬戸内海で観測した合

成画像の位置の深さは水深 30m 以上あるため海底は写っていないと判断できる。CTD 観測によって、青白色の部分が河川水となっており、画像中央に小さく写っている観測船いさなのいる部分は海水であることが明らかになっている。しかし河口フロントを挟んで、R/B 値は、河川水と海水部分であまり差が生じることがなかった。一方、B/G 値は、河川水で少なく、海水で高い値となったが明確な差が存在することが明らかである。

以上の結果から、可視画像において、河川水と海水の判別に R/B 値と B/G 値を用いる手法は、R/B 値では有用性が確かだとは断定できない一方、B/G 値は有用性が高く、一定の深度がある海底の写らない場所では、有効に活用できると推定される。また、図 3.19 に写っている河川内の地形によって発生している泡に対しては、図 3.23、図 3.24 において B/G 値、R/B 値ともに差が生じていなかった。このため、水塊交換で発生していない泡などに対しても有効に活用できる可能性がある。

しかしながら、R/B 値と B/G 値の見積もりを行う際の問題点も浮上した。明度の合成図を作成した際と同様に図 3.26 の R/B 値と B/G 値ともに左部分が低い値をとっていることが分かった。その理由も太陽光の照り返しが写り込んでいるためである。より正確な R/B 値、B/G 値の見積もりを行う前には太陽光の照り返しの除去が必要だと思われる。

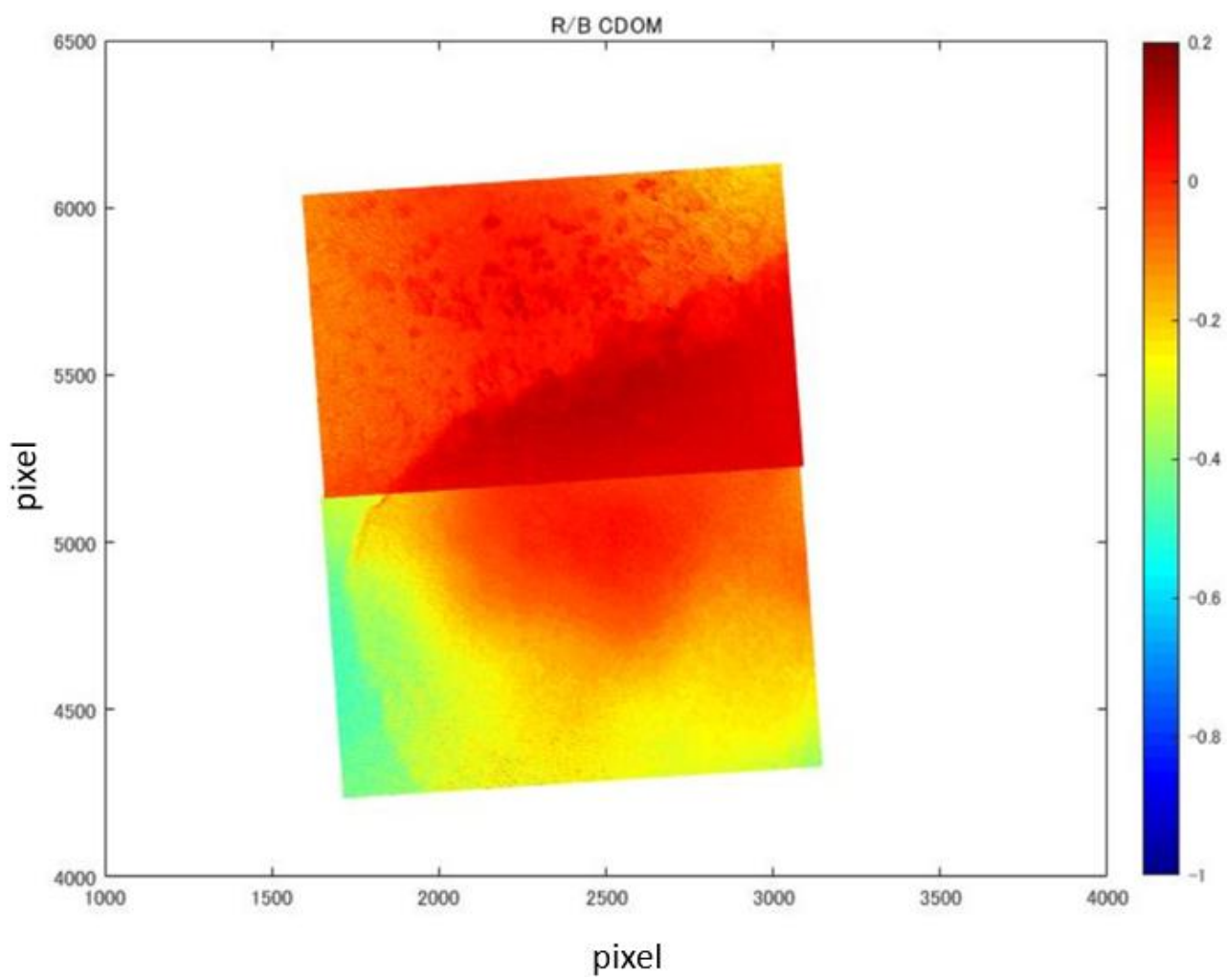


図 3.21 図 3.11 における R/B 値

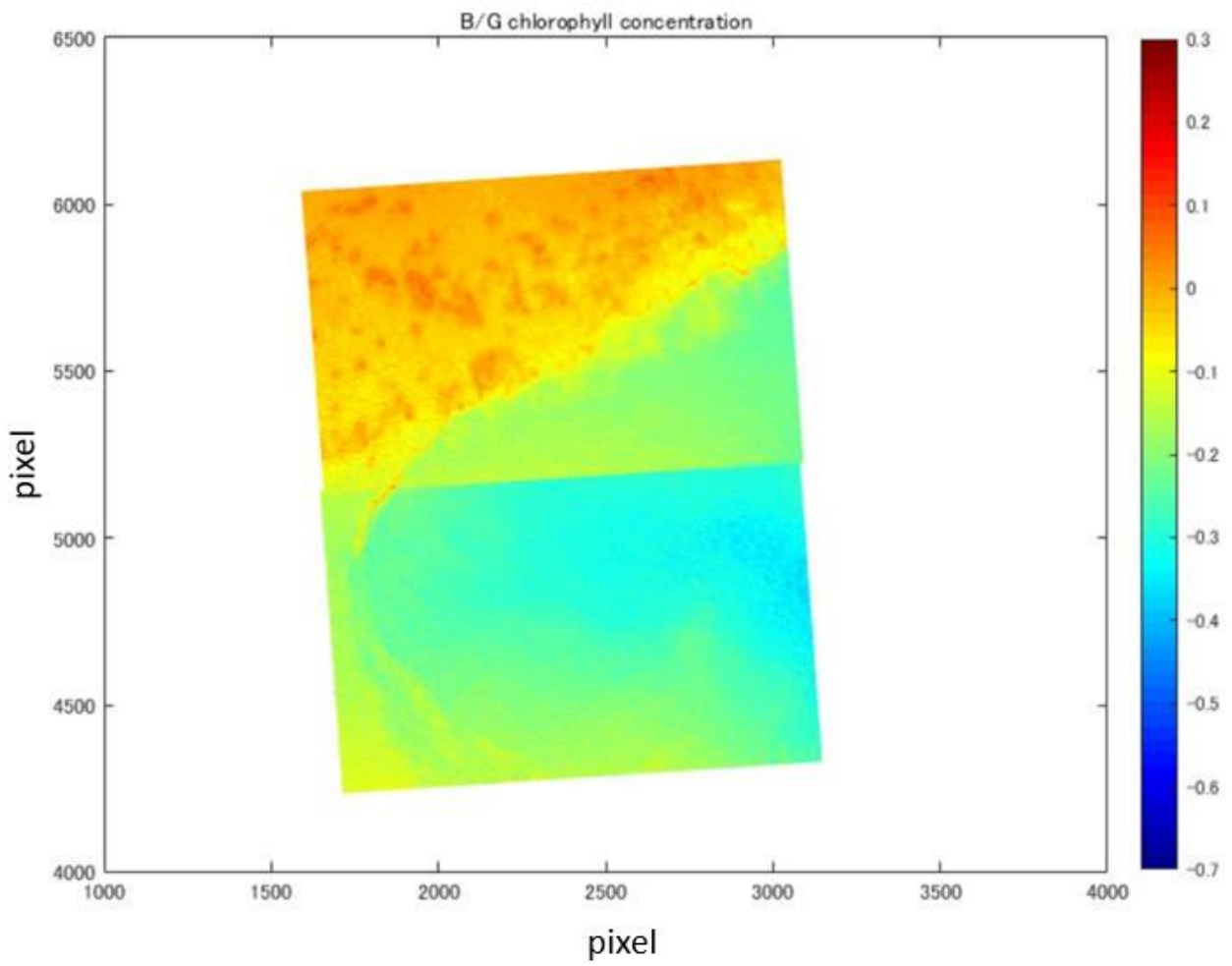


図 3.22 図 3.11 における B/G 値

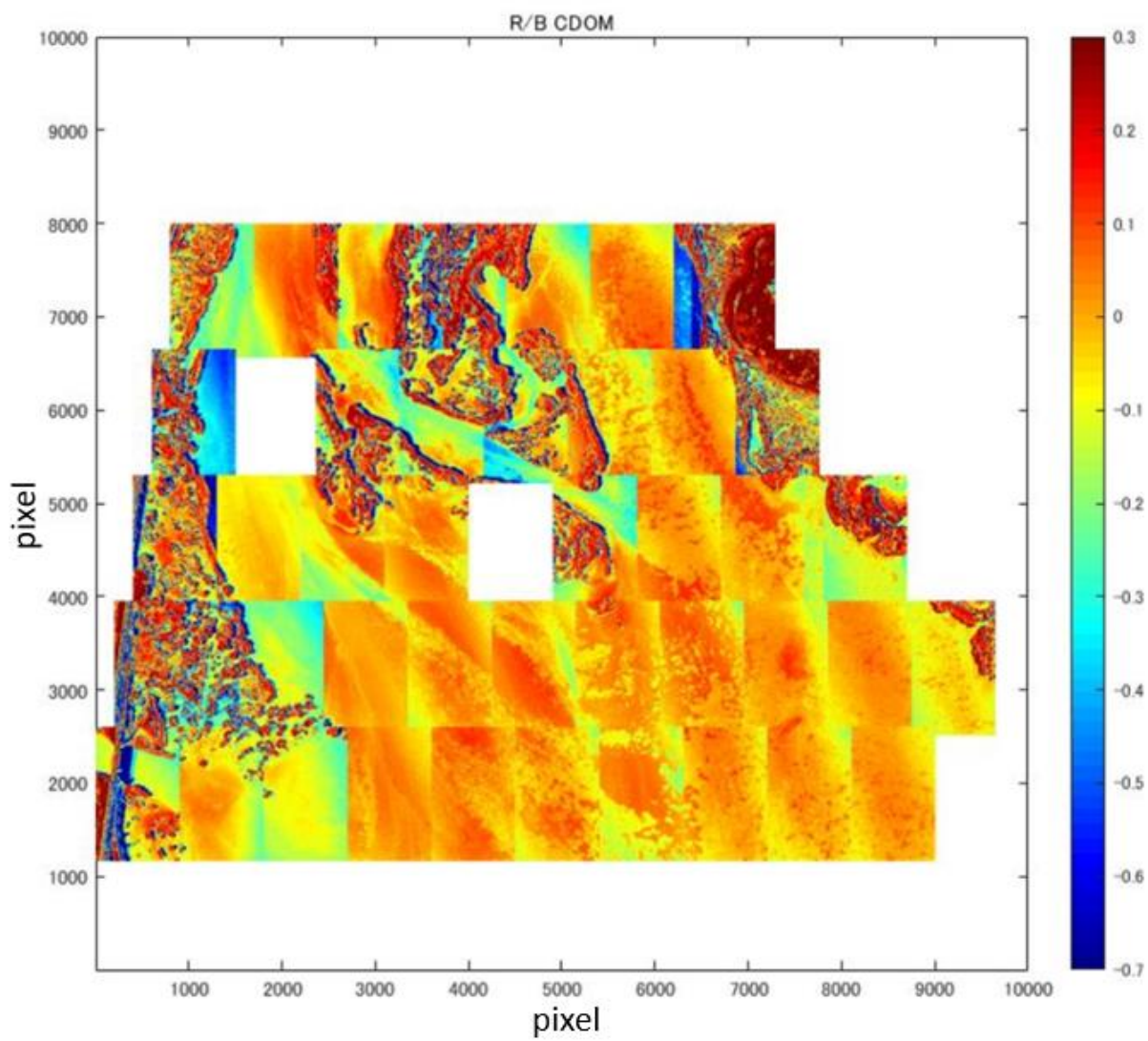


図 3.23 図 3.19 における R/B 値

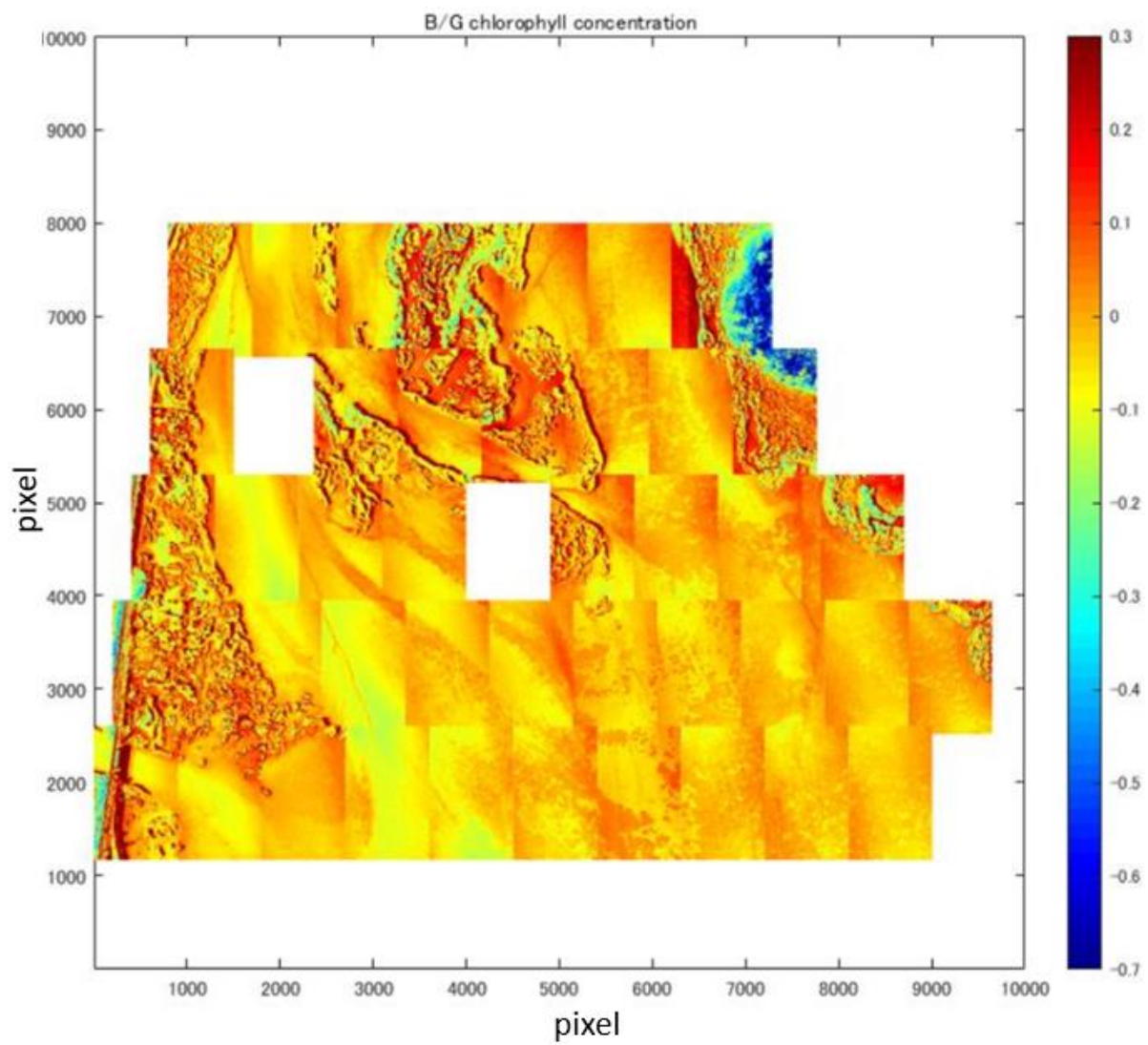


図 3.24 図 3.19 における B/G 値

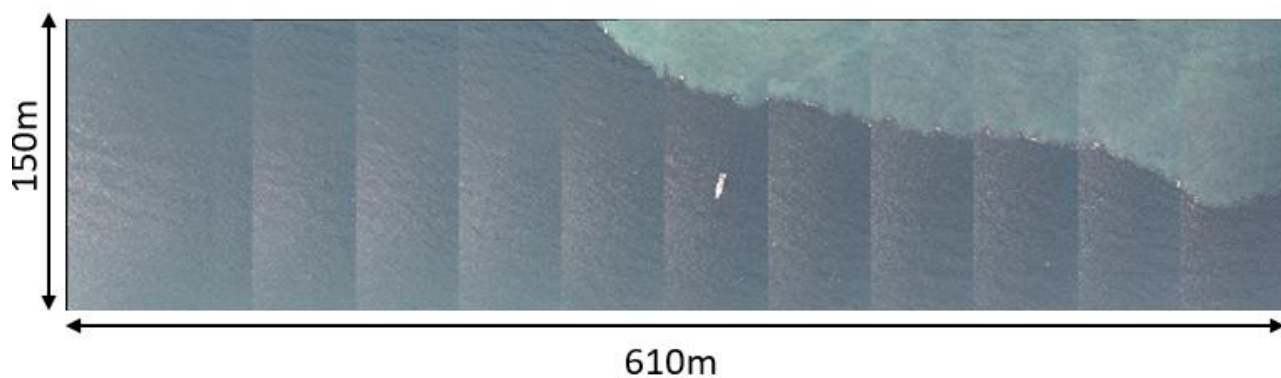


図 3.25 瀬戸内海撮影の合成画像（画像中央：観測船いさな）

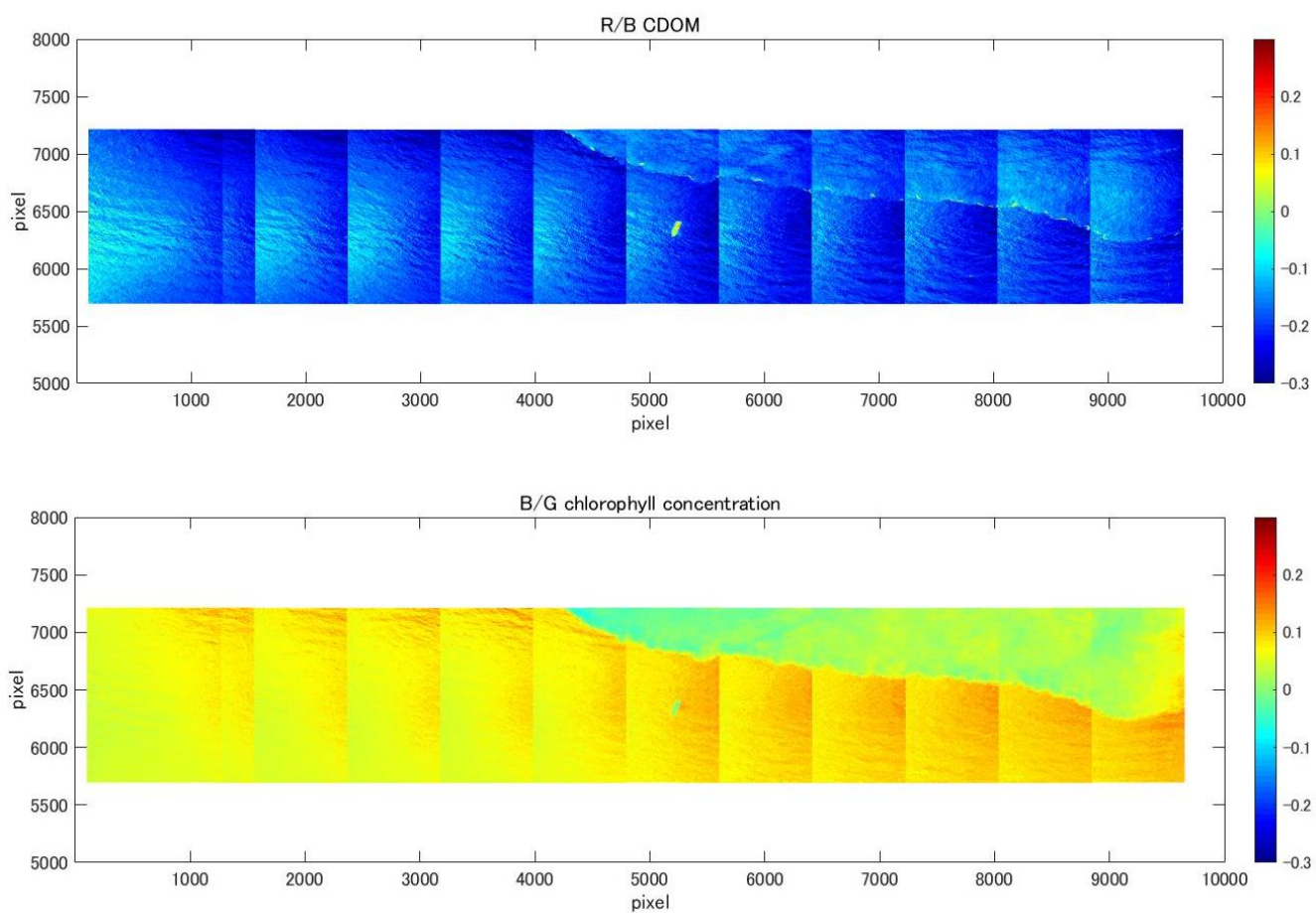


図 3.26 図 3.25 における R/B 値（上図）、B/G 値（下図）

第4章 考察

4.1.観測手法

今回行った厚岸観測では、過去の観測で事前に沿岸近くで海色の変化が大きいことを認知していたため、観測地へ行く前からアプリ内で複数観測予定を用意し、スムーズに観測をすることができた。また、瀬戸内海観測では、森永(2018)が実施したドローンによる熱赤外面像を、可視画像に置き換えて観測計画や手順を再構築して行った。可視画像を用いたことにより、赤外面像に比べ、高解像度かつ広範囲を撮影することができた。両観測ともオーバーラップ率を最小値である10%にしたこともより広範囲で撮影できた理由である。観測においては対象によってこれらの設定には変更が必要になる。

厚岸観測のように、事前にアプリ内で観測準備を行うことができる際には、観測がスムーズに行えるため、飛行回数を増やすことが可能となって、結果として観測時間の短縮に繋がる。瀬戸内海観測のように、観測対象の移動が速い場合は撮影方法を現地で考えなければならない。観測対象の進行方向に対して、進行方向の風下側から撮影して行くことで、合成画像の中に確実に対象を捉えることが可能であることがわかった。進行しながら撮影する方法とホバリングして撮影する方法があるが、進行しながら撮影すると撮影する時間は短く、広範囲撮影することが可能である。しかしながら、オーバーラップ率が低く高度が高くと上空の風によって合成画像としてはうまく繋がらない箇所が出てきてしまう。そのため、進行しながら撮影する場合においては、ドローンが風に流された時を想定し、オーバーラップ率を高め設定したほうが確実であろう。撮影する箇所や観測対象によって撮影方法・オーバーラップ率を変更することで、その後の合成画像の作成とその解析が容易になる。今回提案した観測手法は、まだまだ改善点はあるものの、沿岸海洋過程の観測手法としての適用可能性は十分あると考える。

4.2. 可視画像の画像解析について

4.2.1. 合成する際の注意点

画像を合成するにあたり、いくつか問題点が見つかった。まず、図 4.1 の合成画像から、三つの問題点が挙げられる。一つ目は、画像 1 枚 1 枚の右下赤丸の地点に出ている、太陽光が反射して映り込んだ照り返しが存在することである。森永（2018）の赤外画像にも問題点として挙げられていたが、このような各画像で共通に現れるバイアスには口径食の除去に用いた数値フィルターを使うことで、取り除くことができる。二つ目は、合成画像左上の大きい黄色枠の部分のように、浅い場所では海底にある泥や今回はカキの殻が堆積してできたカキ棚が所々に写りこんでしまうことである。これを海色とどのように識別するか考える必要がある。三つ目は、青矢印で示すように複数個所で画像の抜け落ちがあったことである。図 4.2 の範囲で飛行させた場合も同様に抜け落ちが存在した。撮影された場所の GPS 情報を抜き出してみると、図 4.3 のような結果となり、黄色い矢印の箇所が抜け落ちていた。これは、上空の風などの影響によってドローンが流されてしまったことが予想されること、そして今回の観測においては広範囲を観測するためにオーバーラップ率を最低設定値である 10% に設定したため、50% 以上のケースとは違い画像のない区域が生じてしまう。このようなことを避けるには、もう少し高い割合に設定すべきであったかもしれない。

次に問題点は図 4.4 から二つ見えてくる。まず一つ目は、赤丸の部分のように木々の影が映りこんでしまったことである。沿岸付近に存在している山や高い人工物がある場合、影が映りこんでしまうと RGB 値の調整が難しくなってしまう。二つ目は、隣同士である画像の間に、明度が異なる写真が複数個所存在したことである。これはドローンのカメラが自動調節したためだと考えており、観測を行う前にドローンの AWB（オートホワイト

バランス) 機能を解除しておくことで解決すると思われる。

さらに雲の存在が空撮画像にも影響があることがわかった。図 4.5 の合成画像は、直前に雨が降っていた後に撮影したものある。赤丸の部分において河川に雲が映りこんでしまっていた。雲がまばらに存在する場合はこのような事象が起きてしまうことから、複数の合成画像をさらに合成する場合は均一かつ統一した天候条件で撮影した方がより良い合成画像が取得できると考えられる。

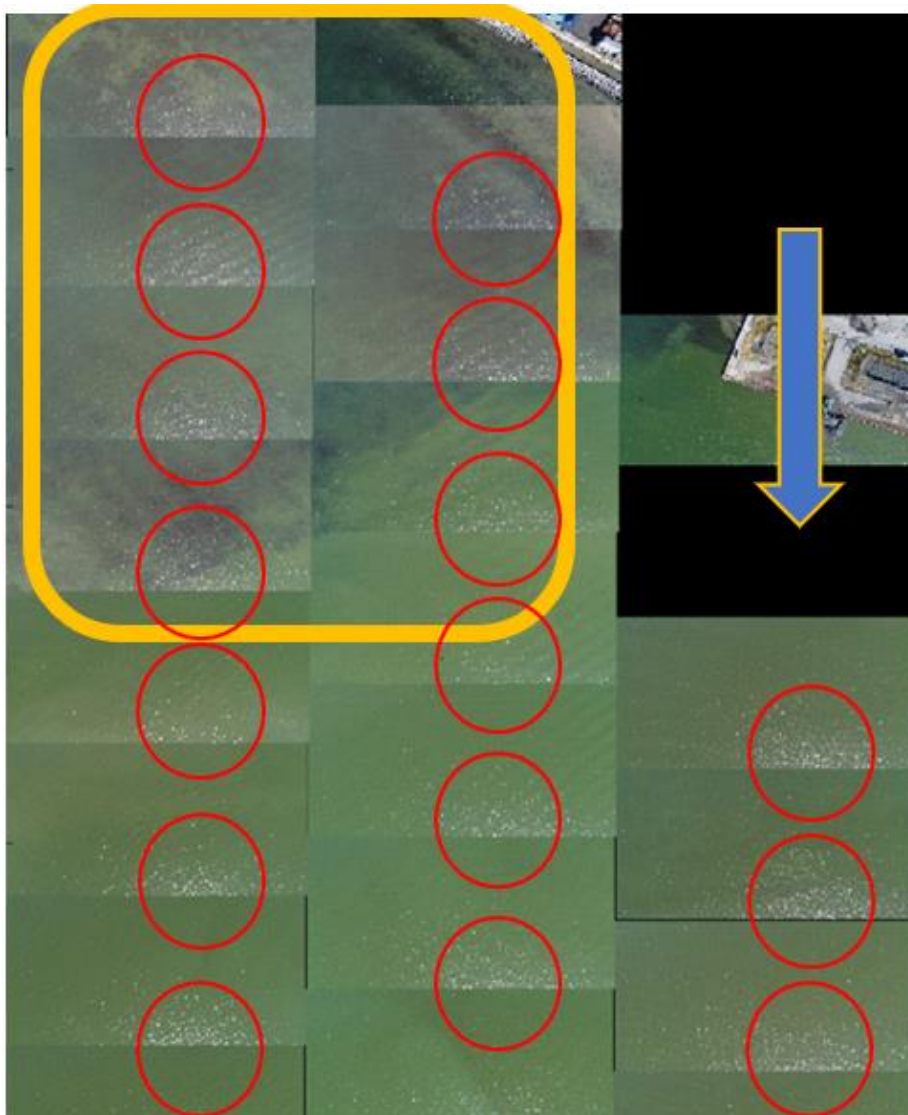


図 4.1 問題点 (1) 〈付録：図 2.7①の一部〉

赤丸：太陽光の照り返し、黄色枠：海底が写り込んでいる箇所、青矢印：画像の抜け落ち

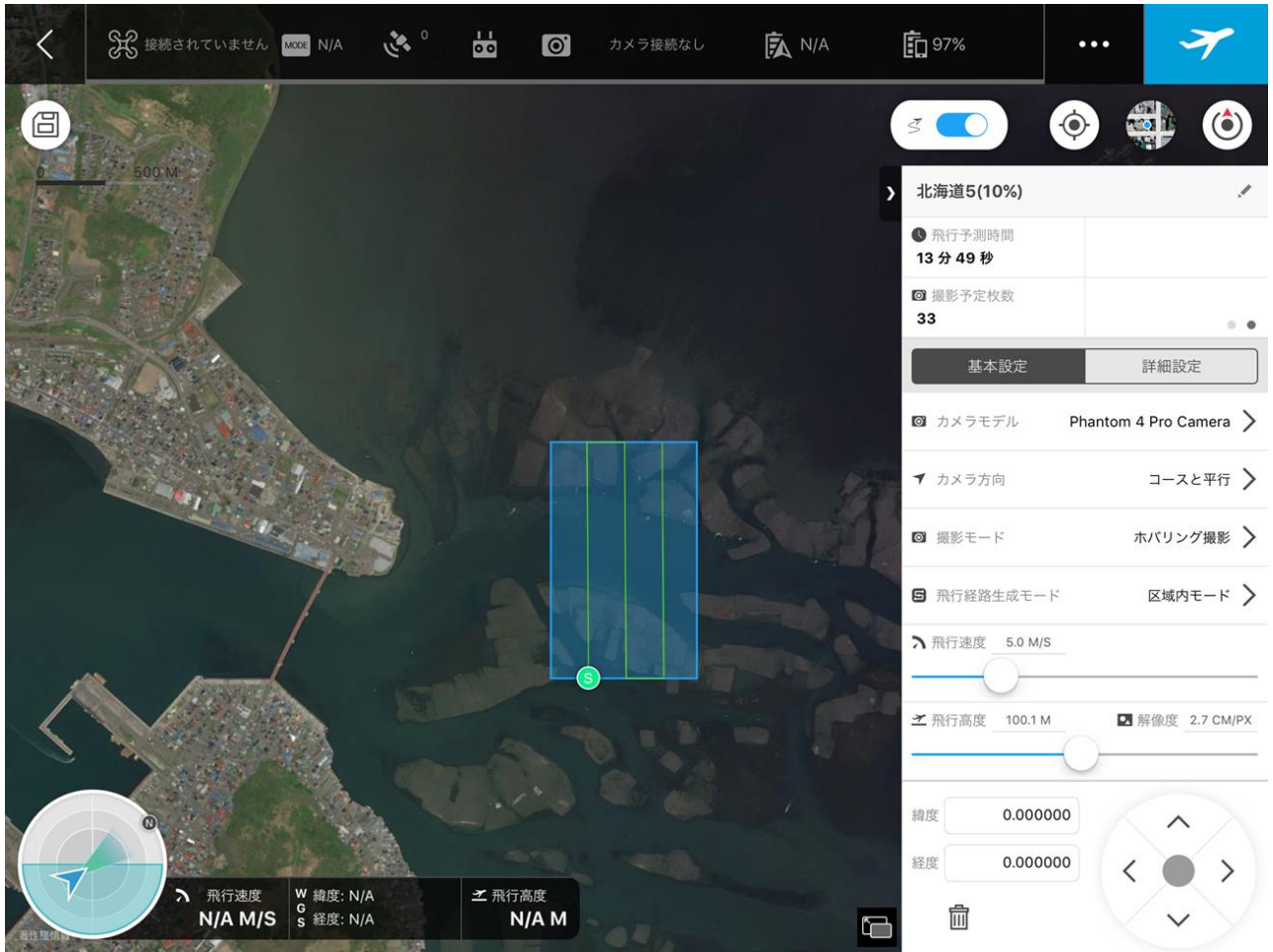


図 4.2 観測予定⑤の DJI GS PRO 飛行予定画面



図 4.3 撮影ポイントの GPS 座標

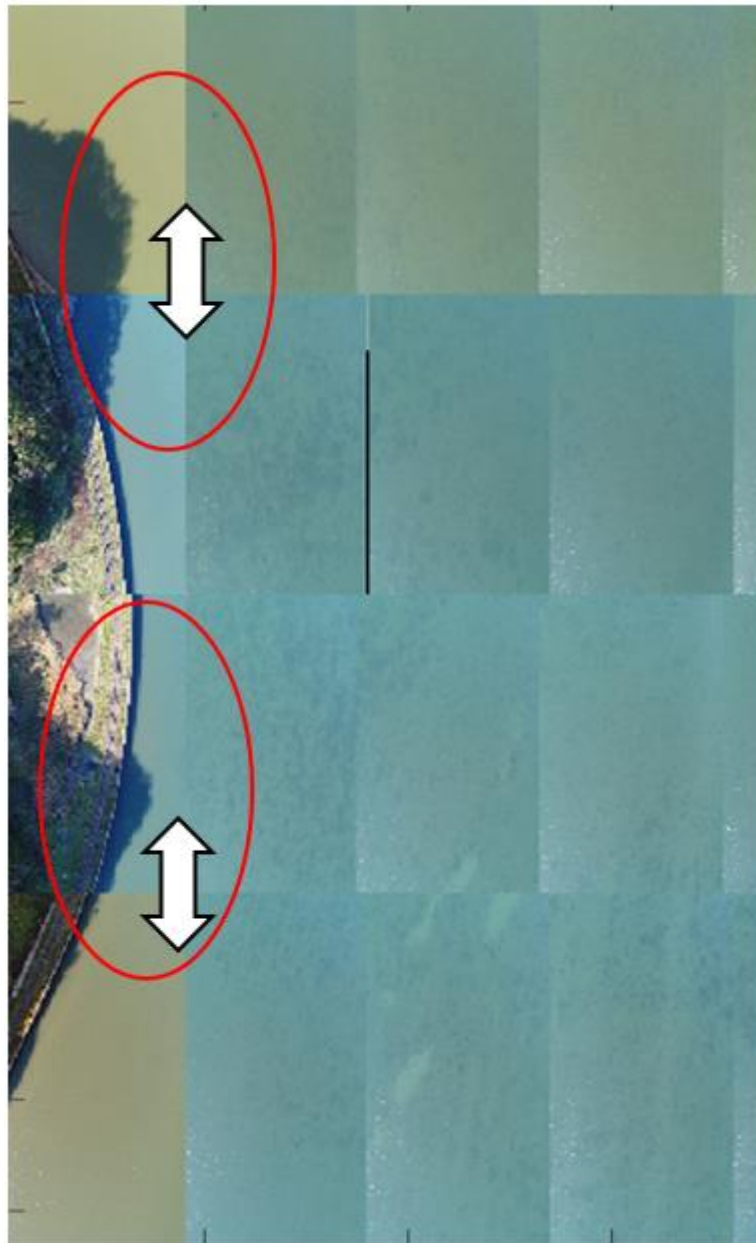


図 4.4 問題点 (2) 〈付録 : 図 2.8⑨の一部〉

赤丸 : 木々の影の写り込み、白矢印 : 隣接画像間の明度の違い

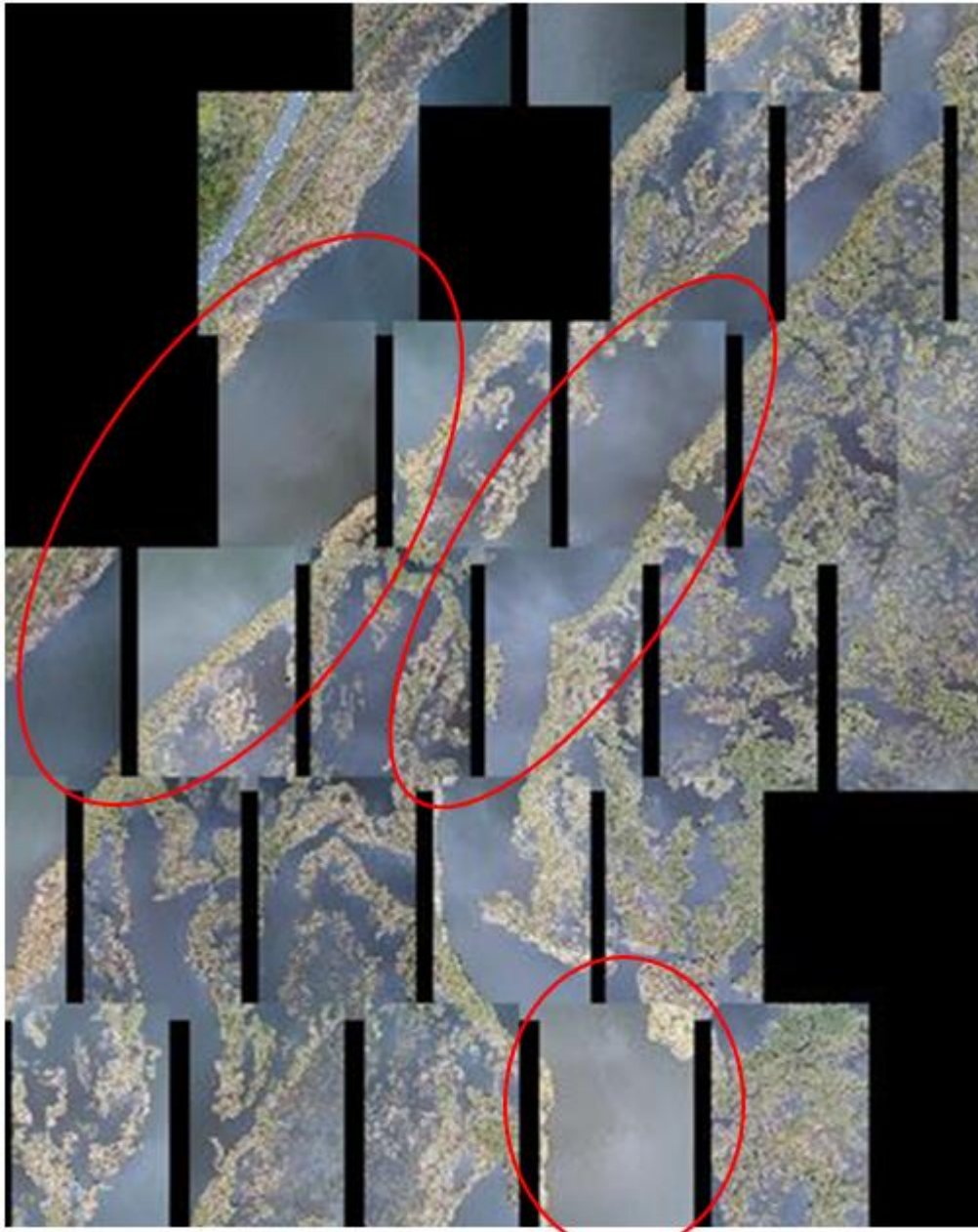


図 4.5 問題点 (3) 〈付録：図 2.8⑭の一部〉

赤丸：河川に雲の写り込み

4.2.2. CIELuv 色空間変換

CIELuv 色空間を使うことにより、水塊の存在を明瞭に確認することができ、フロントの位置の検出が可能であった。また、明度の平均化を行うことで、全体のフロントに重な

る擾乱などの空間情報の抽出に成功した。また、勾配を計算することで、フロントに生じているより鮮明な擾乱の抽出ができた。河川や海水と比較して周辺の陸地や植生との判別も可能であり、海底にも影響されない構造抽出に用いることができた。問題点として、太陽光の反射による口径食も勾配処理の際強く出てしまうことが判明した。そのため、口径食を除去後、勾配計算を行うことが望ましい。

4.2.3. CDOM、クロロフィル濃度

RGB 値から、R/B 値、B/G 値を見積もることで CDOM、クロロフィル濃度の指標として活用できるか検討した。R/B 値は河川で高く海水で低い値で、B/G 値は、河川で少なく海水に高くなる。B/G 値は、河川水と海水の判別に成功した。しかしながら、R/B 値は河川で全体的に高い値となったものの、一部低い値の箇所もあり不確実なものであった。

この処理を行うにあたり、二つの問題点があることが分かった。一つ目に、可視画像に海底が写ってしまうと判別が難しくなってしまうという問題が判明した。そのため、浅瀬では海底の影響がバイアスとして存在してしまう。一方、一定の深度があり、海底が写らない場所で使う見積もり手法としては有効である。二つ目に、太陽光の照り返しが R/B 値と B/G 値に大きく影響してしまうことである。そのため、R/B 値と B/G 値の処理を行う前に太陽光の照り返しの除去が必要となってくる。

今回瀬戸内海の観測では、CTD 観測を同時に行ったが、フロントの移動速度が速く、鉛直断面図としてフロントを判断できるものではなかった。もし、CTD のクロロフィル濃度と B/G 値の間で相関を取ることができると、可視画像からでも海面のクロロフィル濃度について判断できる可能性がある。

第5章 おわりに

本研究では、森永（2018）が行ったドローンを用いた沿岸域の熱赤外空撮観測を可視画像で行うことで、新規な海洋観測手法の提案を目指した。観測においては、厚岸ではアマモ域、厚岸湾、厚岸湖、河口、河川内と顕著に海色の違いを撮影することができ、画像1枚からでも河川内で色の境界や海底、地形から起こる泡の発生を捉えることが出来た。瀬戸内海においても、観測船いさなの水温計の見積もりでは水温差1℃以上の河口フロントを可視画像で捉え、その海色の違いを確認することができた。

観測で得た可視画像から、全体のフロントに重なる擾乱などの空間情報の抽出を行うために、RGB色空間からCIELuv色空間へ変換後、明度(L)に注目して画像解析を行った。はじめに、撮影した可視画像で本来連続的に撮影されているはずの隣接する画像間に明度の違いが生じていたため、明度の平均化を行うことで、合成画像に補正を行い、フロントでの河川水と海水の海色の違いを鮮明化させることが出来た。次に、フロント周辺に顕著な渦構造などの空間情報のみを抽出するために勾配を計算し、勾配の強いフロントの空間構造を抽出し、逆に勾配の弱い海底などの情報を除くことに成功した。

ドローンを用いた可視画像から得ることのできる情報として、海色を基にした空間構造の抽出だけではなくRGB値を利用した観測データとしての活用方法が提案できないか検討した。RGB値のR/B値はCDOM、B/G値はクロロフィル濃度の推定手法の一つとして衛星観測では用いられていることから、同手法を用いることで海水と河川水の判断ができるか検証した。河川水と海水の判別に、R/B値を用いることの有効性は確認ができなかったが、一定の深度がある海底の写らない場所では、B/G値は有効に活用できる可能性が高いと考えられた。今後、CTDのクロロフィル濃度とB/Gの値で十分な相関関係の検証を重ねれば、可視画像からでも海面のクロロフィル濃度について判断できる可能性がある。

観測や画像解析における注意点としては、複数の課題が見えたものの、問題点の改善やドローン性能の向上によって、可視画像を用いたドローン観測が、沿岸域の海洋観測の代表的手法に成り得ると考えられる。

謝辞

この研究を遂行するにあたり、終始暖かく見守って下さっ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いたします。

研究観測に関しては、厚岸観測で共同研究者である北海道大学低温研究所の三寺史夫教授、東京大学大気海洋研究所の田中潔准教授には、観測方法についてのアドバイスなど大変お世話になりました。心より御礼申し上げます。また、瀬戸内海観測においては、愛媛大学の観測船を利用させていただき、ありがとうございました。観測の準備などでは、本研究室の技術職員の皆様、学生の方々のご指導、助言がなければ、成し得ることができませんでした。皆様に心から感謝いたします。

最後に、これまであたたかく応援し、支えてくれた家族と周りの友人たちに感謝の意を表したいと思います。

参考文献

1. 松本良浩(2016) : 衛星画像による水深の推定 ー海洋情報業務への利用に向けてー,
REPORT OF HYDROGRAPHIC AND OCEANOGRAPHIC RESEARCHES No.53
2. 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
ーン化の試みー、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
3. 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. 宇野木 早苗 著 : 沿岸の海洋物理学, 東海大学出版会, 450p
5. DRONE ドローン専用ページ byPINTORU (閲覧日 2019/1/10)
ドローン (無人航空機) の歴史
URL : <https://recreation.pintoru.com/dro-ne/the-history-of-the-drone/>
6. DJI Phantom4 Pro スペック (閲覧日 2019/1/25)
URL : <https://www.dji.com/jp/phantom-4-pro>
7. 前田 晃宏, 宮本 康, 森 明寛, 岡本 将揮, 九鬼 貴弘, 作野 裕司 (2016) : UAVを
利用した汽水湖沼の実用的な赤潮観測の事例,Journal of the remote sensing society
of Japan), Vol.36, No.2, 126-130
8. 長谷川 夏樹, 鬼塚 年弘, 阿部 博哉, 鎌内 博光, 渡辺 健太郎, 仲岡 雅裕, 岸 道郎 :
流速データから見た厚岸湖の生物生産, 第 58 回日本生態学会, 札幌, 2011/3/10
9. L.M.Goddijin and M.White(2005):Using a digital camera for water quality
measurements in Galway Bay, Estuarine, Coastal and Shelf Science 66 (2006) 429-
436

付録

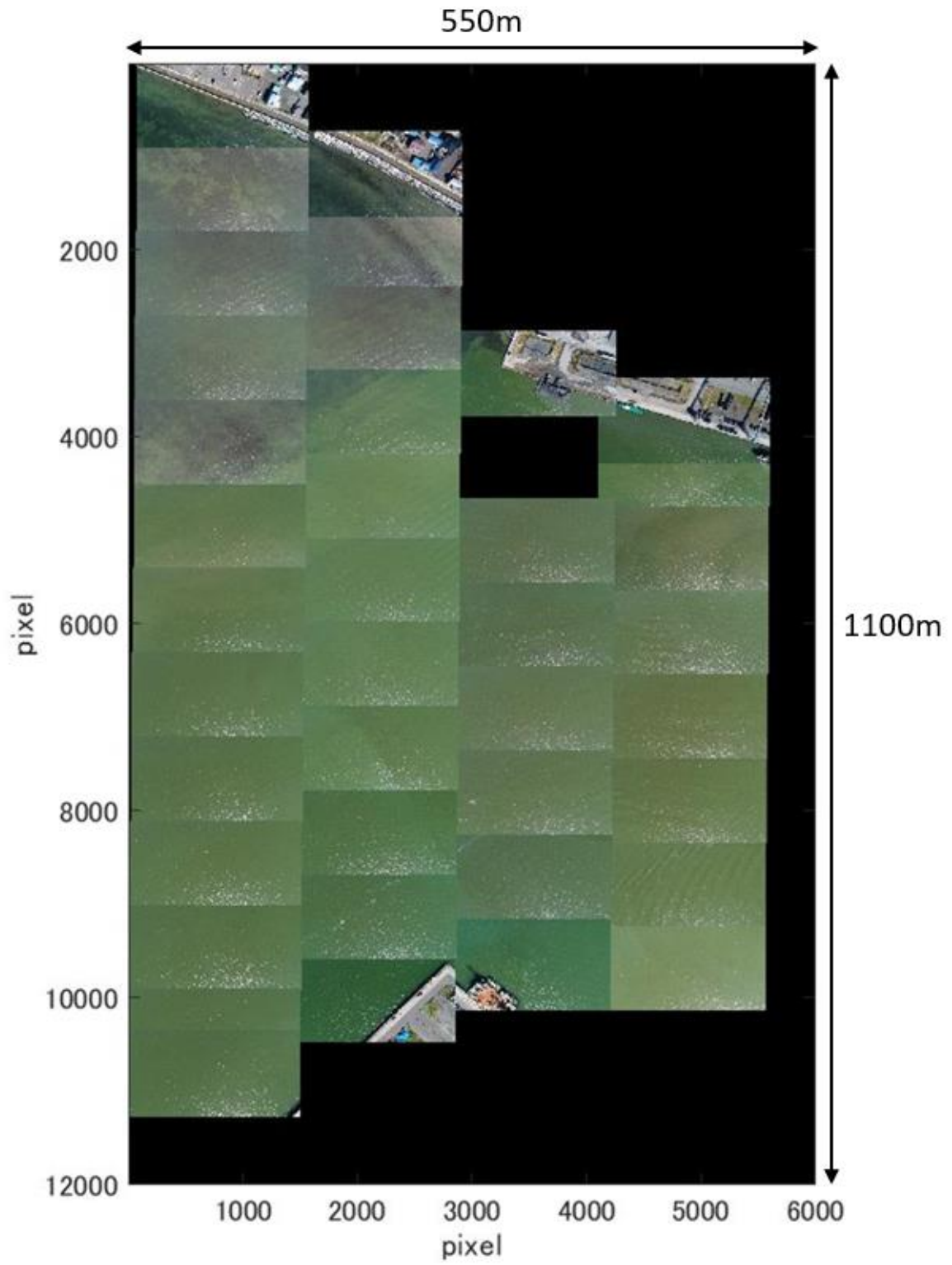


図 2.7①

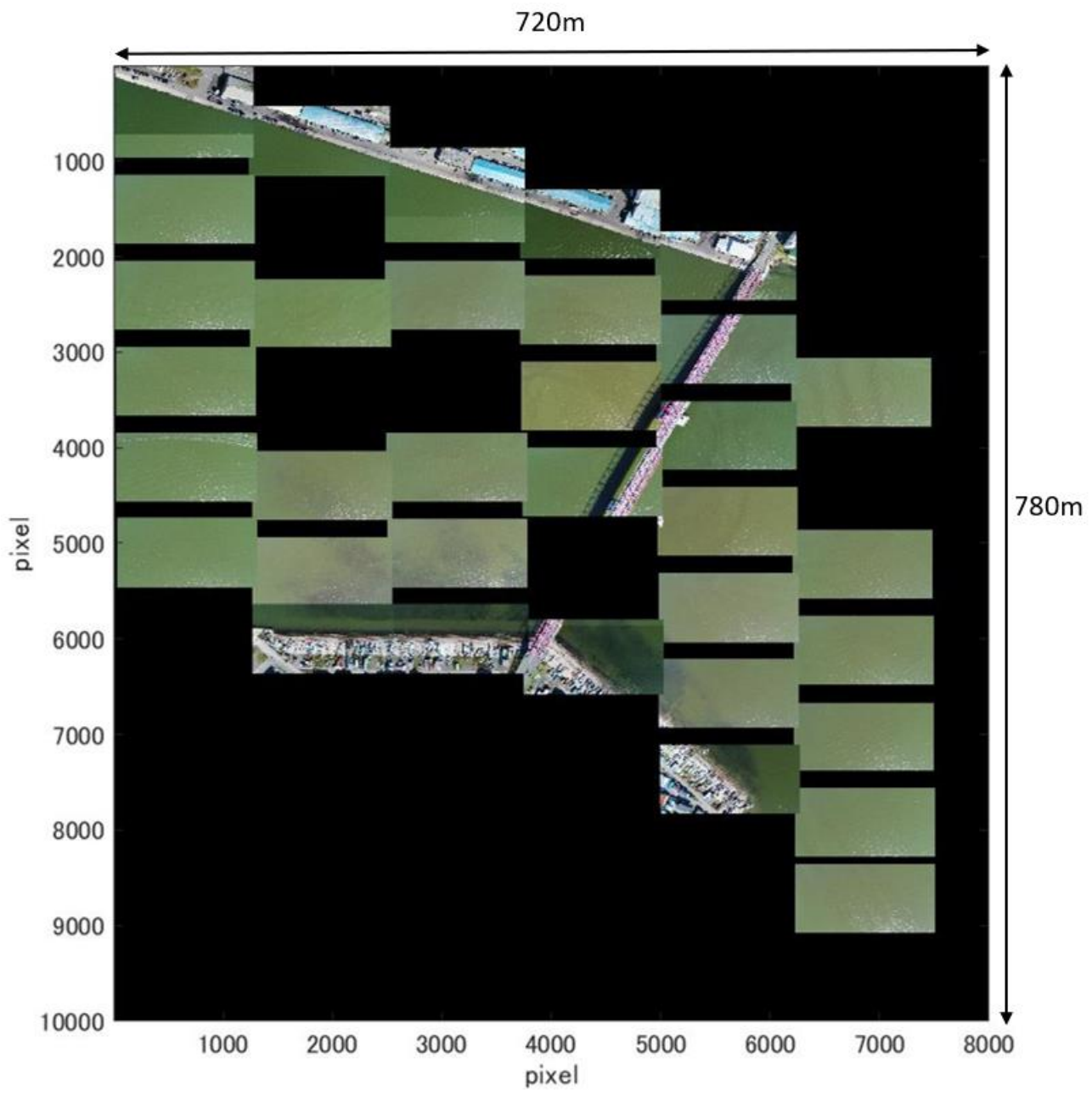
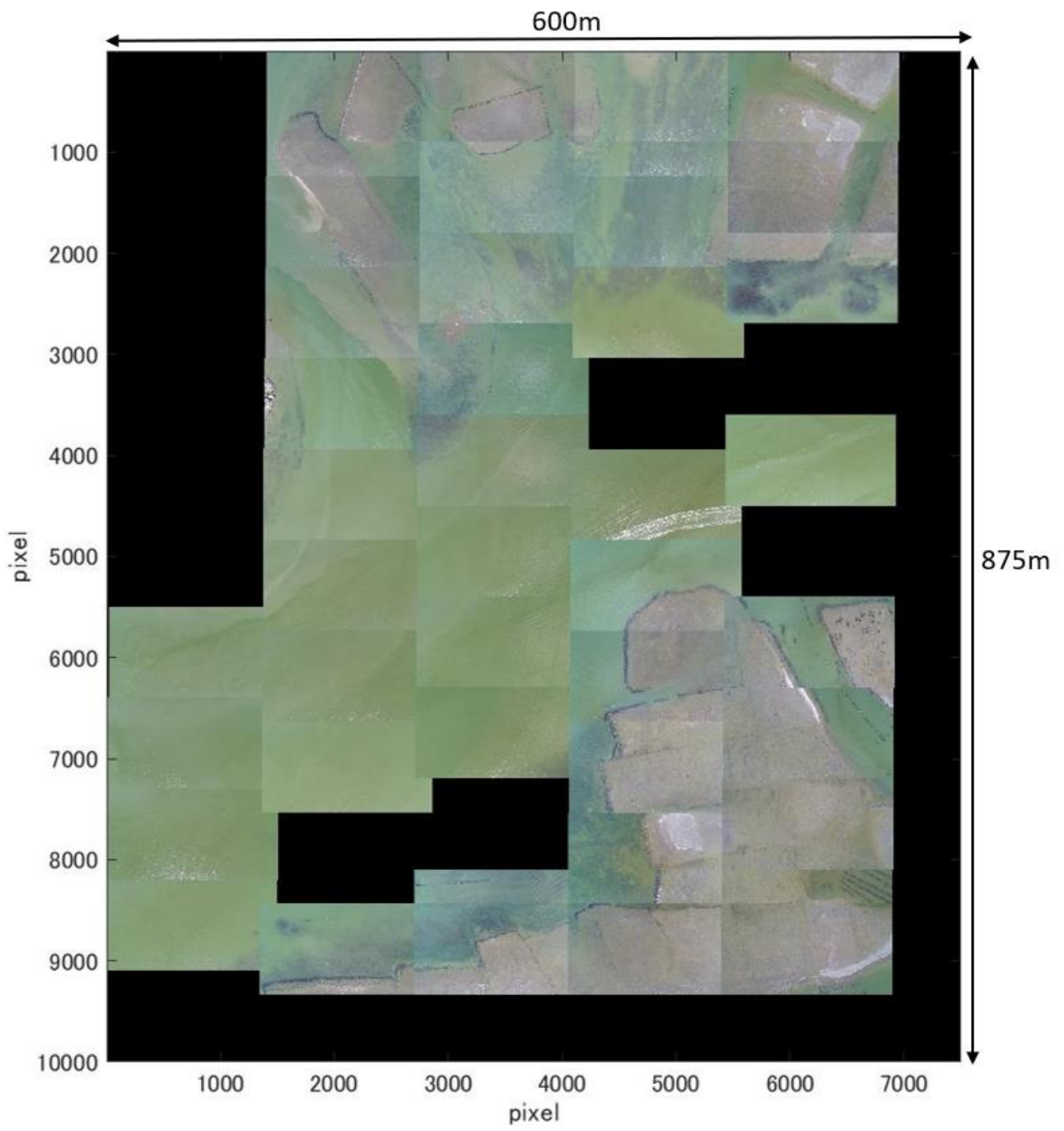
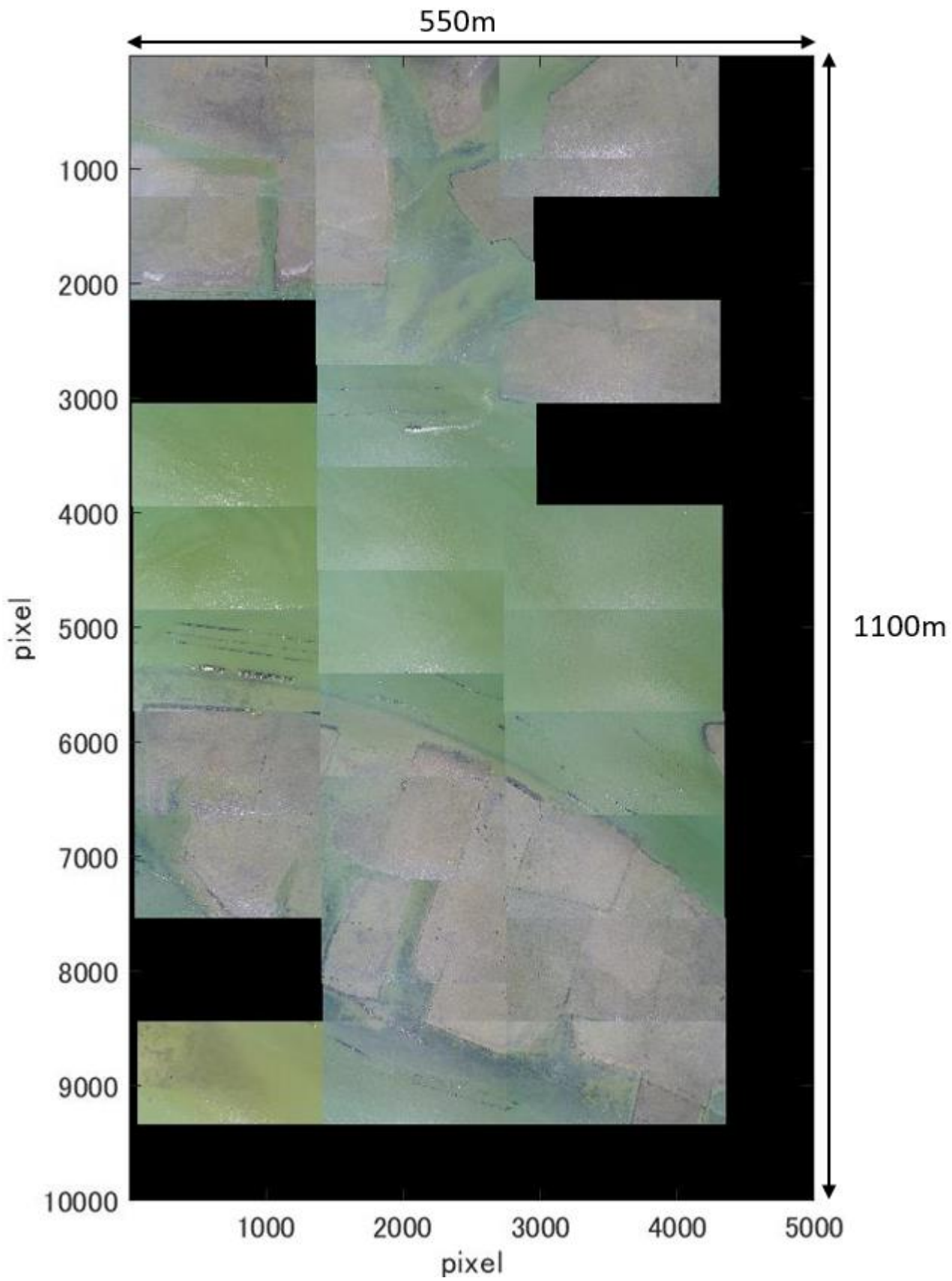


图 2.7②



☒ 2.7③



☒ 2.7⑤

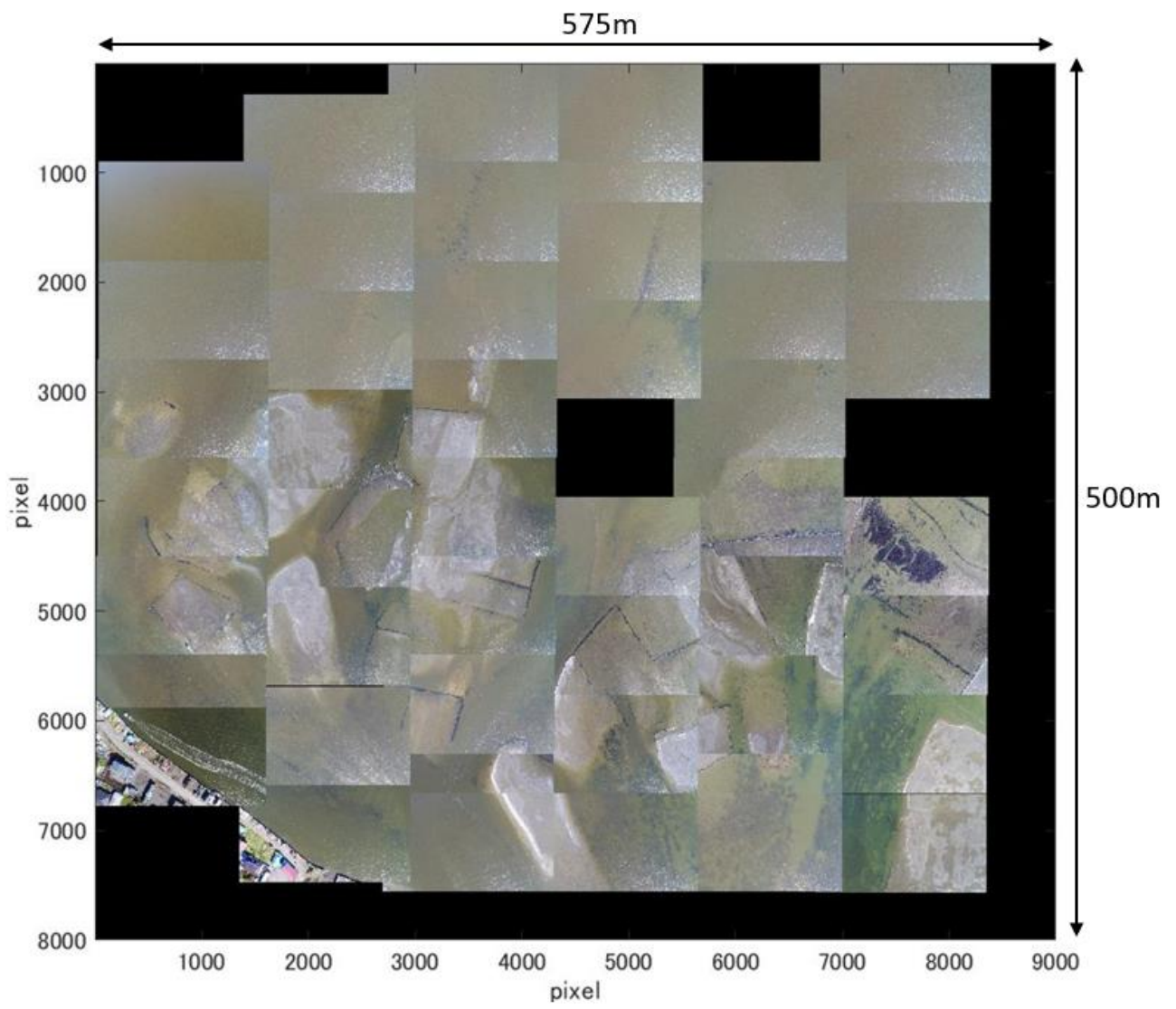
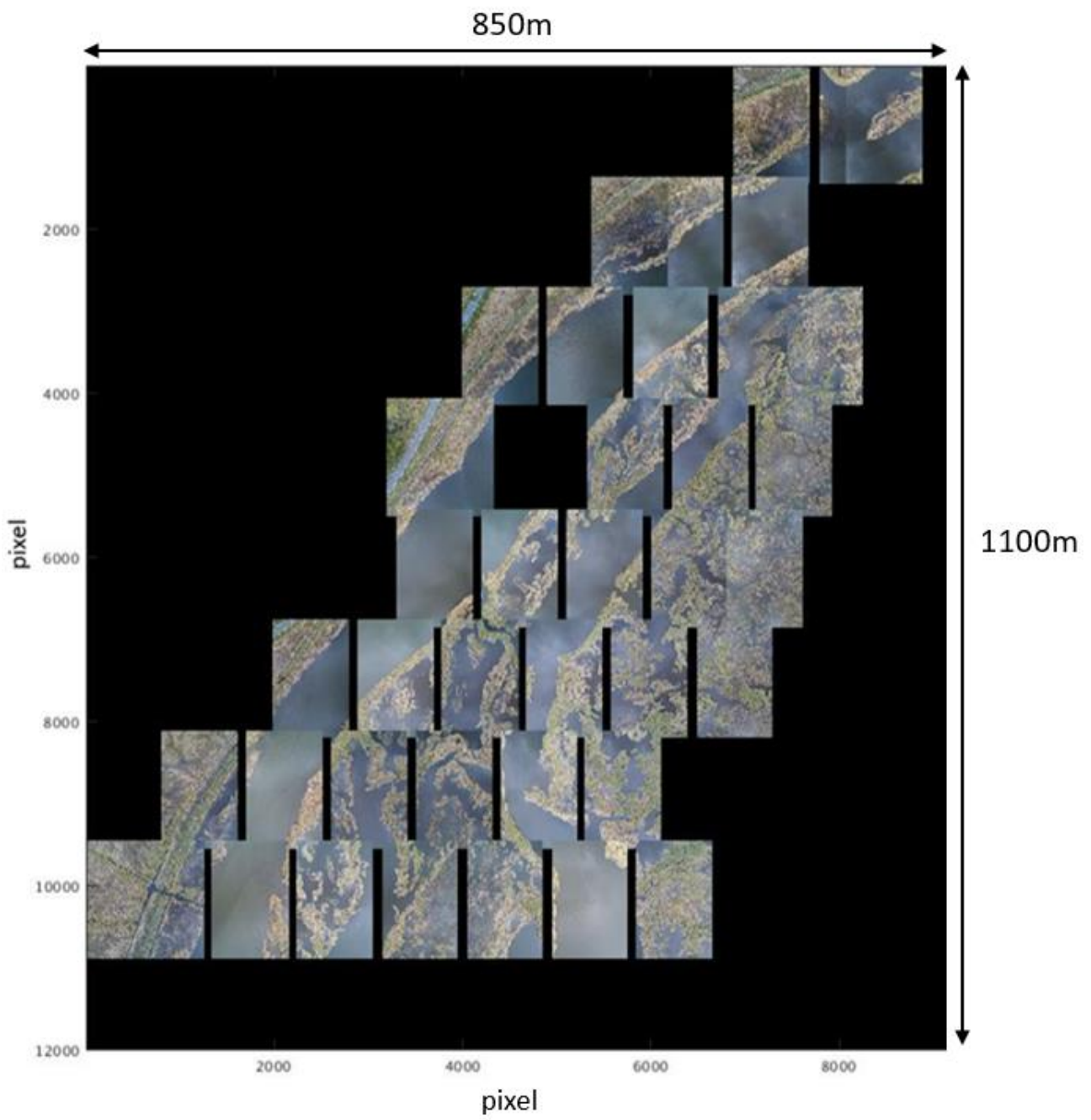


图 2.8⑦



☒ 2.8⑭

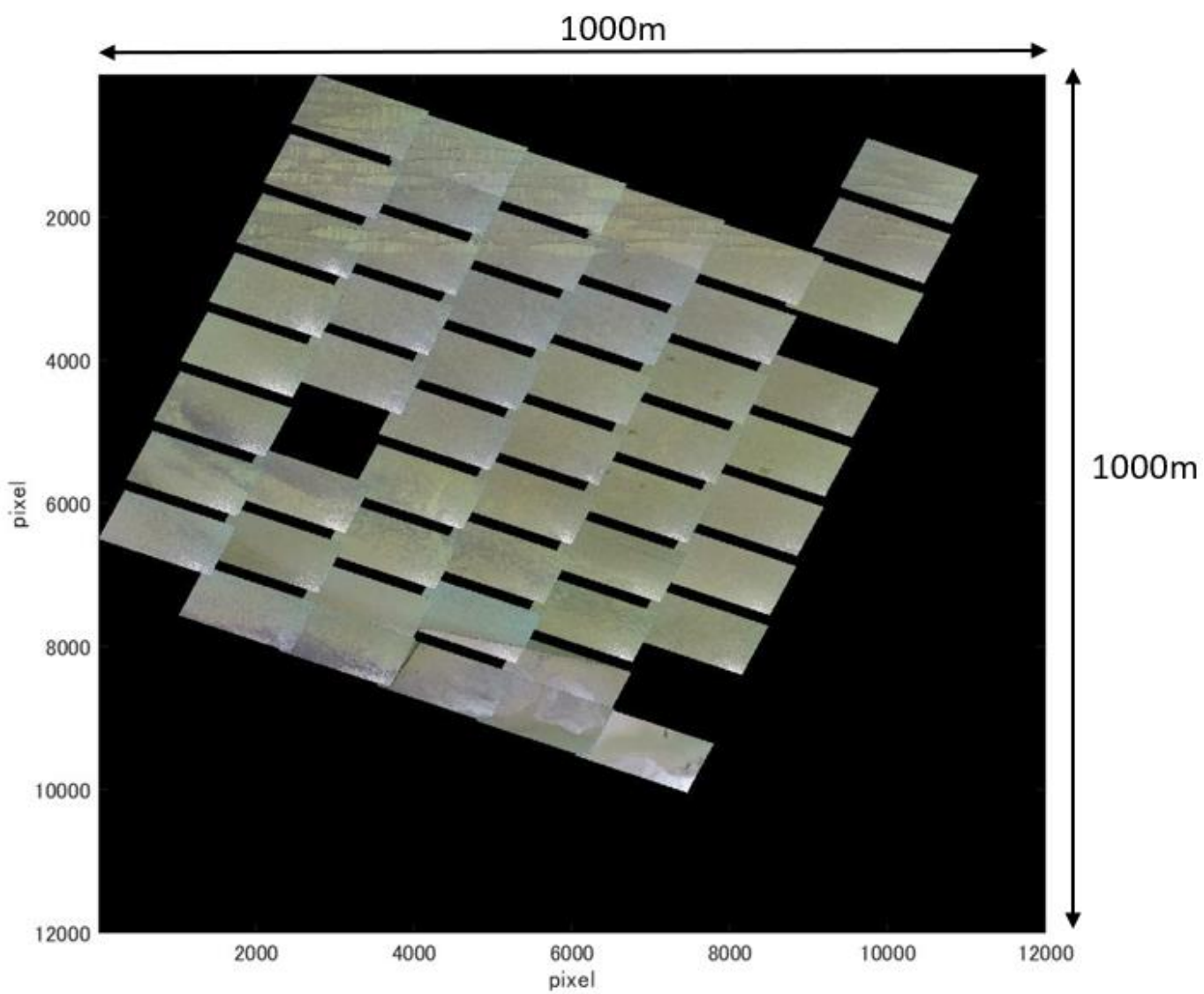
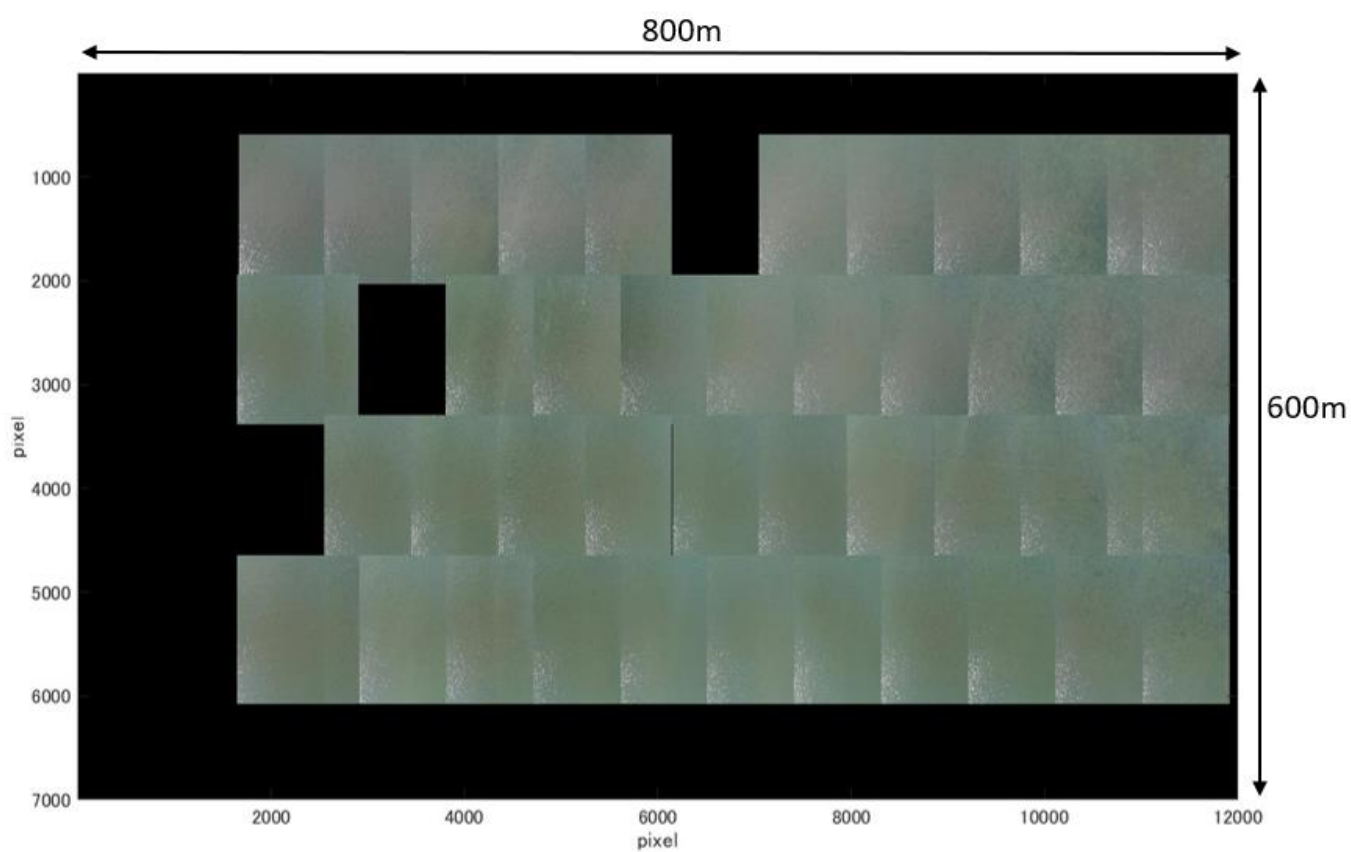
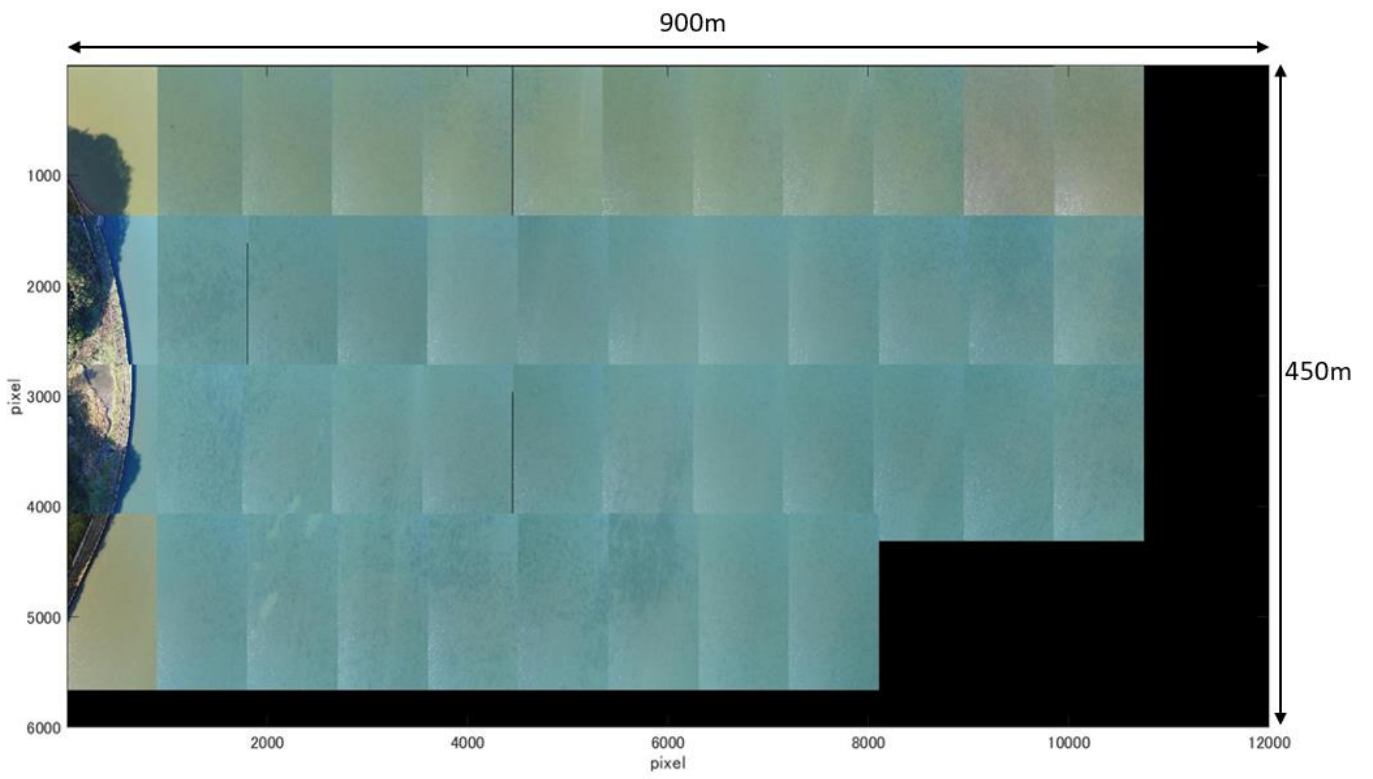


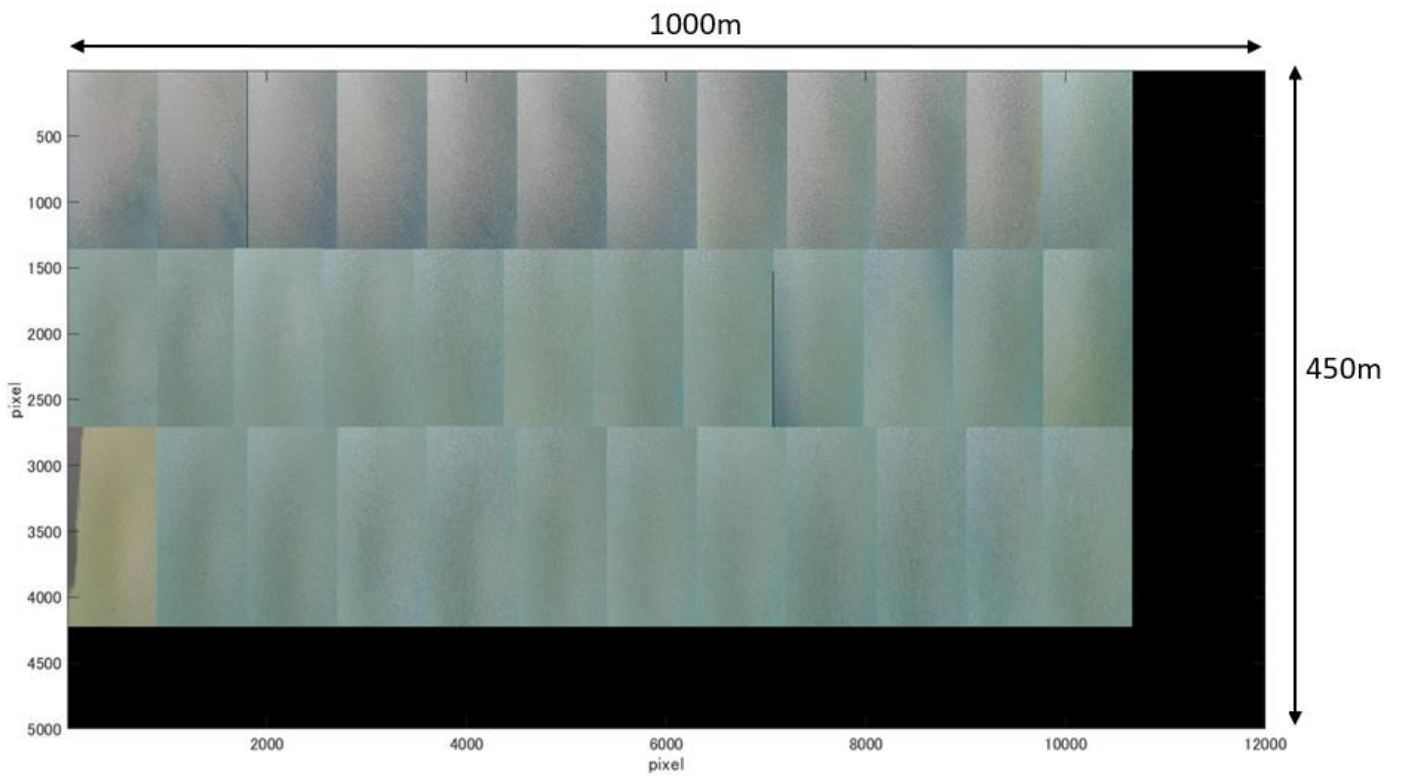
图 2.9⑯



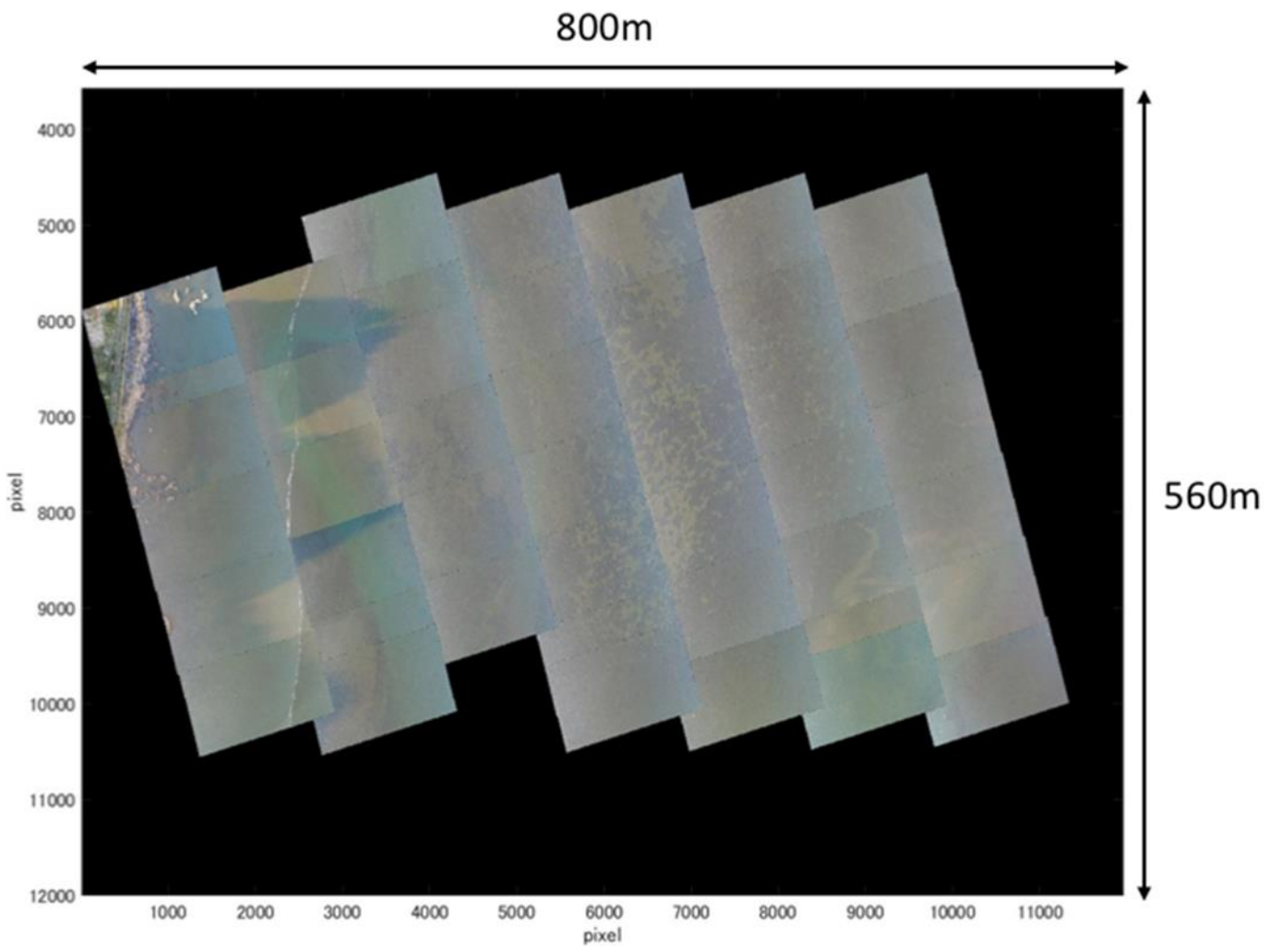
☒ 2.8⑧



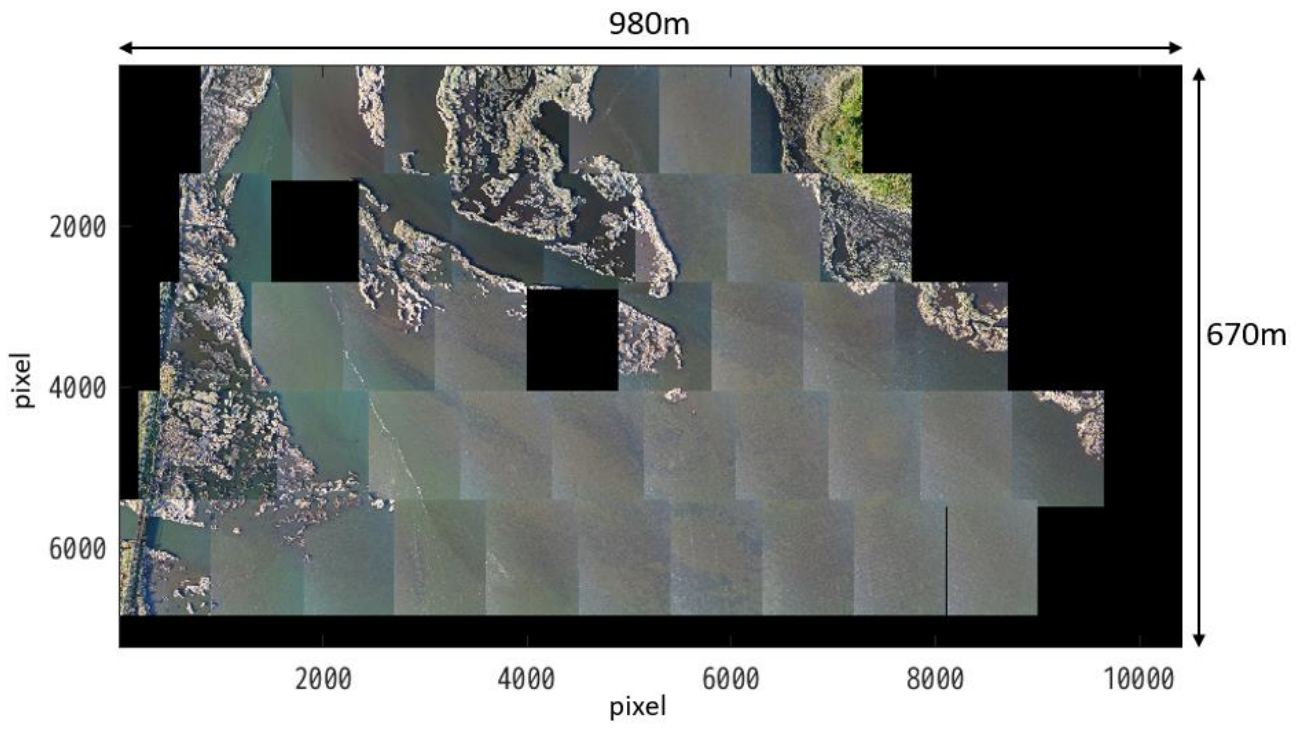
☒ 2.8⑨



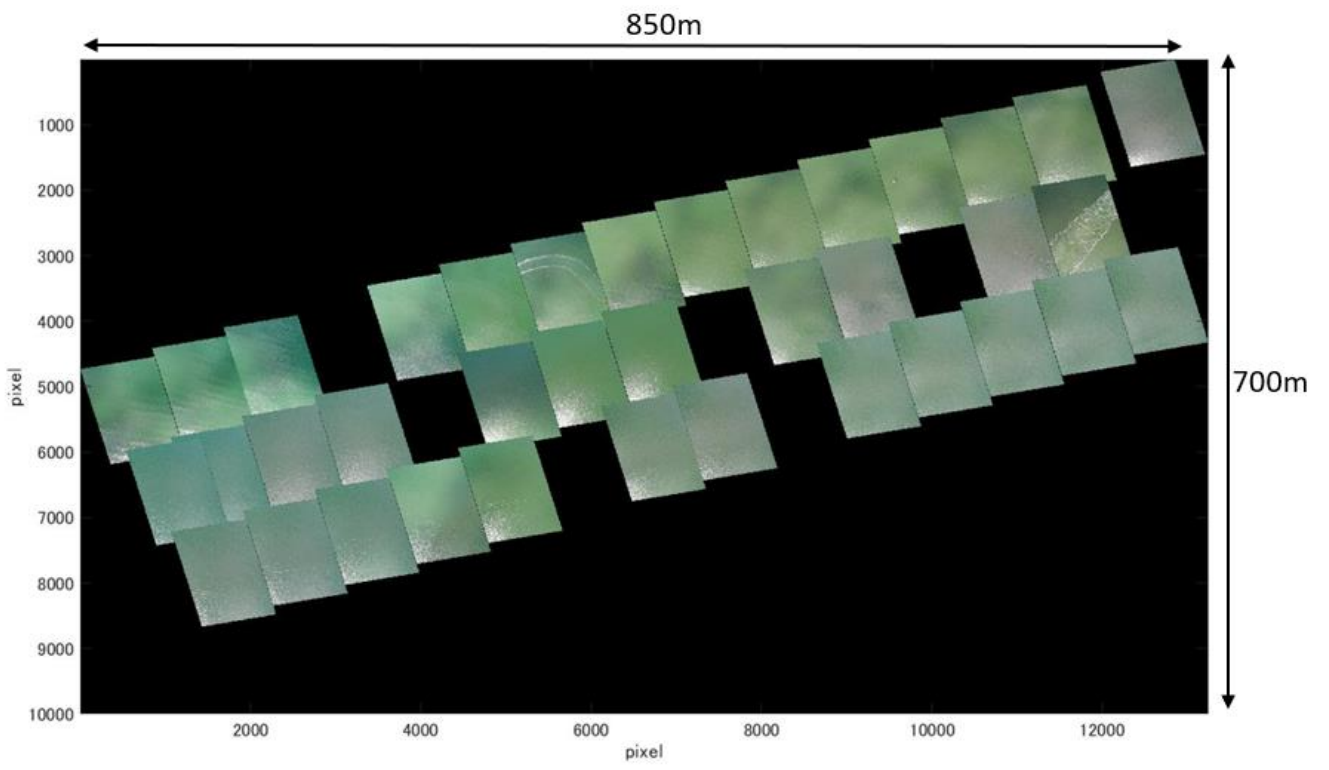
☒ 2.8⑩



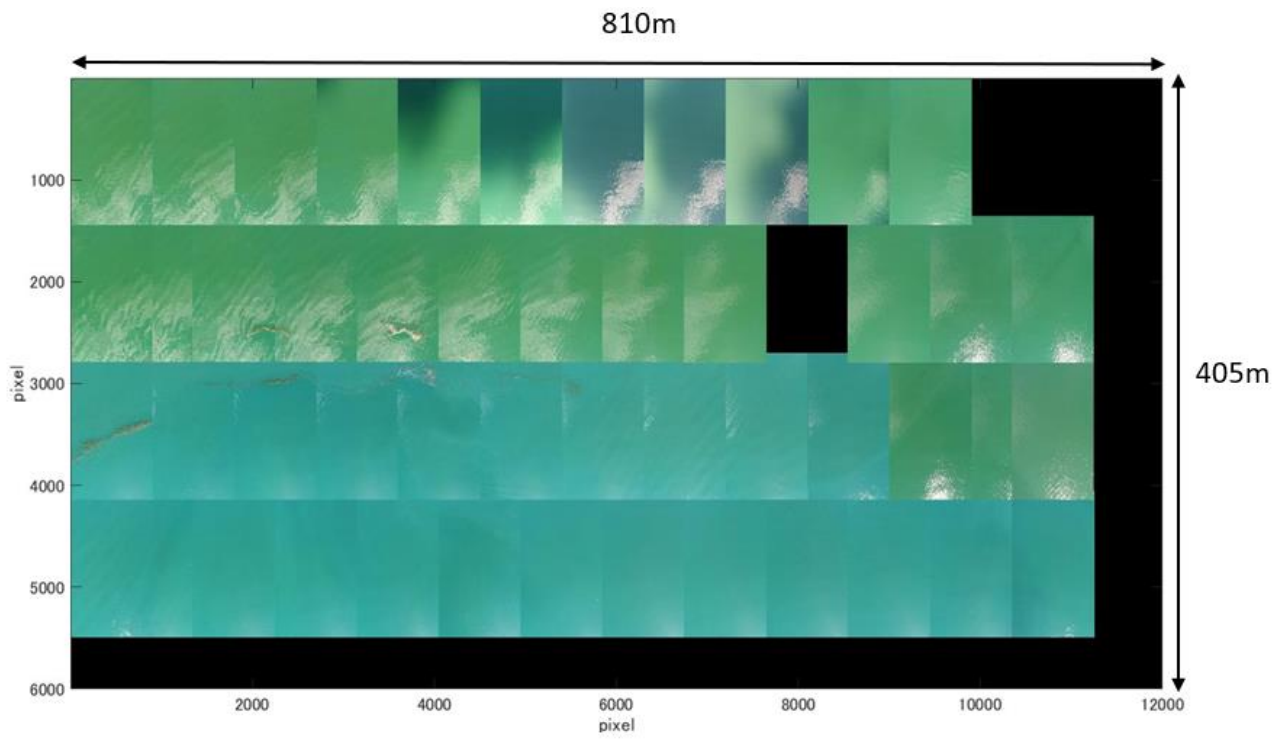
☒ 2.8⑫



☒ 2.8⑬



☒ 3.2⑳



☒ 3.2㉑