

農業および建設分野のSociety5.0実現 に向けたUAV測量技術の研究

令和7年

岡山大学 大学院環境生命科学研究科
社会基盤環境学専攻

佐野 ひかる

目次

第 1 章 序 論	1
1.1 農業分野の課題	1
1.2 建設分野の課題	5
1.3 本研究の目的と概要	8
第 2 章 農業分野における DX の現状と課題	9
2.1 農業のスマート化と本研究の位置づけ	9
2.1 作業の自動化・省力化について	10
2.2 情報共有の簡易化について	10
2.3 データの活用・可視化について	11
2.2 農業分野においてのセンシング技術	16
2.3 水稲直播栽培の現状と課題	17
2.4 圃場不陸についての既往の研究と現状	20
2.5 ICT 技術を活用した測量技術	21
2.6 農業への UAV 技術の適用	23
第 3 章 建設分野における DX の現状と課題	25
3.1 沿岸域を対象にした計測手法の概要	25
3.2 既存の手法の計測性能検証実験	30
3.3 既存の手法の課題	32
第 4 章 スマート農業実現に向けたセンシング手法	37
4.1 スマート農業用 UAV ハード仕様	37
4.2 計測現場・時期	39

4.3	計測データの解析手法	41
4.4	精度検証結果	43
4.6	各時期計測結果	46
4.7	圃場の均平化の評価	53
4.8	不陸計測手法の検討	54
第5章	海岸保全への応用	61
5.2	海岸保全への応用の背景	61
5.2	海岸保全用計測機器のハード仕様	65
5.3	海岸保全への応用事例	69
5.4	海岸保全計測の実用性の評価	75
5.5	海岸保全のための施工管理への応用	83
第6章	結 論	94
	参考文献	96

第1章 序 論

1.1 農業分野の課題

少子超高齢化とそれに伴う労働人口の減少がもたらす課題の解決を目指して、DX（デジタルトランスフォーメーション）の活用によるライフスタイルの変革が求められている。防災・減災分野も例外ではなく、これまで人的な労力や熟練技術者の経験に頼っていた点検・調査作業を、IoT（Internet of things）などを駆使することで効率的かつ省力化したプロセスに替える試みが行われている。さらにプロセスの変革だけでなく、産み出される新しい付加価値により、現在直面している地球温暖化に伴う気候危機に対処しようとする試みも始まっている。具体的には、斜面、河川あるいは沿岸域など、あらゆる国土の地形情報を3次元でパソコン上に再現する仮想空間を作り、人工知能（AI）などを使った各種データ処理技術を用いて、土砂災害、洪水あるいは台風などによって発生する災害を仮想空間内で予想することで有効な対策を立案し、その結果をフィジカル空間（現実空間）に反映させる、という試みである。これにより、想定外の豪雨に対して脆弱となりそうな河川個所を見逃すことなく抽出することが可能になり、これまでの点検・調査に要する労力と時間を大幅に削減する超スマート社会（Society5.0）が実現する。そこでの詳細な地形や地理情報を簡単に取得できるツールとしてのUAV（Unmanned Aerial Vehicle）が注目されている。ここでは、陸上だけでなく、水面下の地形の3次元データを同時に計測するグリーンレーザを搭載したUAVを用いた計測技術の最新情報を紹介する。なおUAVはドローン（Drone）の呼称が一般的なので、本稿ではグリーンレーザドローン測量という呼称も使用する。本研究は、このUAVを用いたDX技術による変革が要求されている分野として農業分野と海岸保全分野を取り上げる。

現在日本では、出生率の低下による少子高齢化や技術者の減少による労働力不足等の様々な課題を抱えている。特に、人口の減少に関して農村部や過疎地域から都市部への人口集中が進み、人口集中地区（DIDs）の人口割合は2035年には7割と推定され、非人口集中地区、つまり農村部や人口過疎地域では人口が8割減少するとともに65歳以上の人口の高齢化率は36%にも上ると推定されている。図1.1-1は人口減少率と高齢化率を示し、傾向はほぼ一致している。全国の中山間地域に位置する集落を中心に考えると、1990～2000年代の約10年間で約5000集落が農業としての機能を失っている。その地域での無定住化が進み、農地や森林等の農村資源や農道や畦畔等の農業生産活動の維持管理が不可能となり、集落としての機能も失われつつある。農林水産省によると、今後、農業生産資源を維持管理することは難しくなる、と農業従事者の45.3%が見込んでいる。このように農業従事者の約半数が農業の次世代への継承は困難であると考えている。

農業は食料の供給を始め、国土の保全や文化の継承など様々な役割を担っていることから、これからも持続的な発展を務めていく必要があり、そのためには農業で十分な所得が得られるような対策や人材の確保、またスマート農業・農業機械の電機化等が必要となってくる。このような課題を抱えていることを踏まえ、農業分野では、若者の農業離れ、また農業は世襲制度がとられていることが多く、農業のノウハウや技術が次世代に継承されにくい傾向にあることが課題として挙げられている。図1.1-2より、農業従事人口の著しい高齢化により、農業従事人口の全体の割合において65歳以上の農業従事者の割合は、昭和60年代より、およそ20%以上増加し60%以上にも上り、農業世帯員数・農業就業人口も著しく減少していることが分かる。一方で、農業の経営面積について、10ha以上の圃場を扱っている農業従事者は2005年には全体の3割程度だったのに対し、約10年で5割弱まで増加しており、次世代の担い手農家の経営面積が急速に拡大している。¹⁾

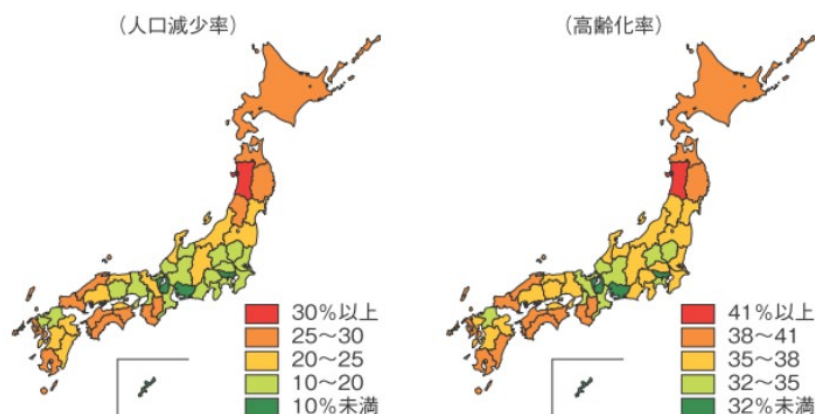


図 1.1-1 人口の減少率と高齢化率の割合¹⁾

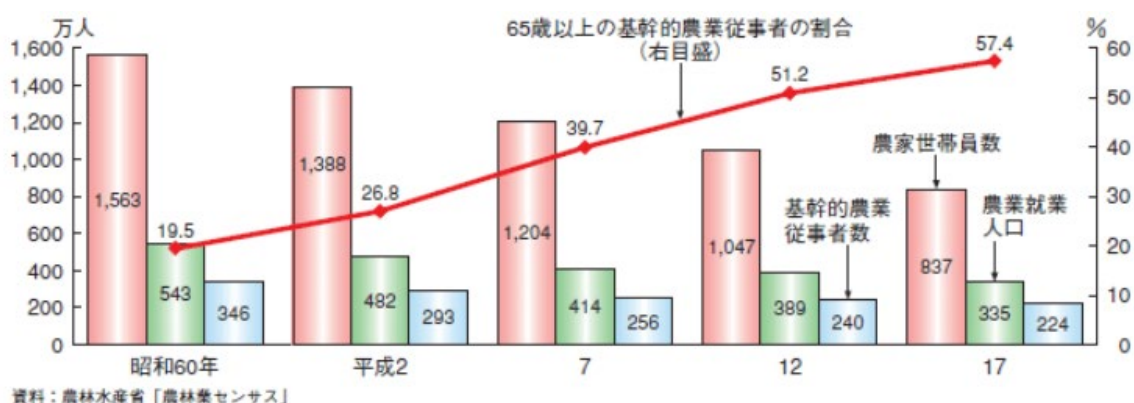


図 1.1-2 農家世帯員・農業就業人口・基幹的農業従事者等の動向（販売農家）¹⁾

このような課題の解決や対策として、民間企業の研究により農業のデータ化やロボットによる自動運転等のスマート農業と呼ばれる農業のスマート化に関する研究が進められている。農林水産省では2019年よりスマート農業の社会実装の加速化として、「スマート農業実証プロジェクト」として全国69の地域で実施している。農業の自動化・情報の簡易化・データの活用を実現場で検証することで農業のスマート化を図っている。スマート農業には、農業の各工程に分かれており、様々な分野で多岐にわたる。具体的に、畑を耕すのにトラクターの自動走行、農作物生育のための追肥をドローンを用いて散布するなどの、人的な労力が必要だった部分を機械が担おうとするものがある。また別の分野では、生育の状況やこれまでの農業のノウハウをデータ化し運用することで、過去の傾向やデータから、生育状況の把握と効率化を目的として行っている、農業全般の情報を収集しデータ化する方法で農業の運営を効率化するものもある。これらの農業のスマート化により、①超省力・大規模生産の実現、②作物の能力を最大限に発揮、③きつい作業・危険な作業から解放、④誰もが取り組みやすい農業を実現、⑤消費者・実需者に安心と信頼を提供等の目標を農林水産省は掲げており、図1.1-3に示す。²⁾

スマート農業の将来像



図 1.1-3 農林水産省が掲げるスマート農業の将来像²⁾

そうした中で本研究でのスマート農業における立ち位置は、主に水稻の圃場不陸の観測に着目する。稲作の手法は大きく2つに分けると、苗をあらかじめ育て、その後水田に栽培する苗床栽培法と種籾を直接圃場に植える直播栽培法がある。全国的水稻作付面積の約97.5%が苗床栽培法、約2.5%が直播栽培法で行われている。³⁾

直播栽培は、近年時間的・労力的なコストの削減が可能なることから、農業従事者の負担を考え、農林水産省が推奨している。水稻農業の約25%の時間的コストを占める苗床の育苗、田植えをしないでよい人的労働力が削減できることが最大のメリットである。こういったメリットは、現代の農業の課題の解決にむけた少人数で効率的かつ高品質生産な農業技術の向上につながる。主に育苗・移植(田植え)作業の春時期の作業の省力化が図れること、また稲自体の収穫時期が1~2週間程度遅れるため、作業ピークを分散することも可能である。直播栽培による労働時間の変化のイメージを図1.1-4に示す。このような農業従事者にとってメリットの多い水稻直播栽培だが、作付け面積が増加しない原因はいくつかある。まず、冷涼・湿潤な気候条件下での出芽・苗立ちが不安定になりやすく、市場価値の高いコシヒカリ等の品種では倒伏しやすく栽が難しい。また、圃場に不陸の程度が大きいと、生育にムラがでてしまう。一般的に圃場に不陸、つまり圃場内に凹凸があると生育にムラが発生したり、低すぎる場所では苗立ちの数が減少し、高すぎる場所では苗が成長しにくい傾向があったりすることから、最終的な収量や品質の低下につながる。水稻直播栽培で安定した収量・品質を得るには、高い農業技術力が必要となる。こういった圃場の不陸への課題の解決のために、直播前の圃場の代掻きなどの均平化作業が重要なポイントとなってくる。圃場の均平化は圃場全体を耕し、均平にする作業であり、大きな労力と時間がかかる。また、均平にする均平化作業は技術が必要で新規就農者には難しく、熟練者の知識に頼らざるを得ない。⁴⁾

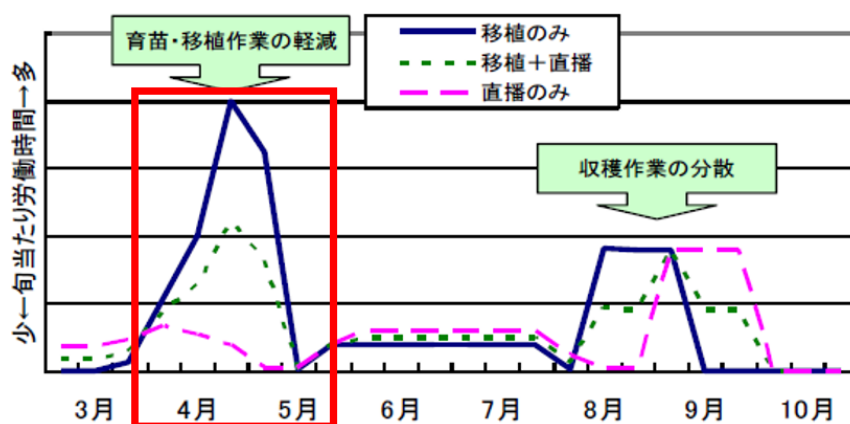


図 1.1-4 直播栽培法の導入による労働時間の変化のイメージ³⁾

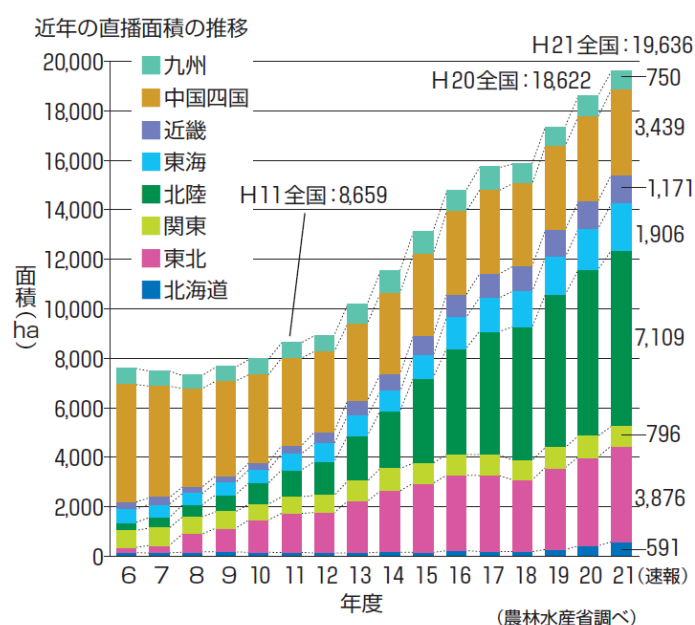


図 1.1-5 近年の直播栽培の推移³⁾

本研究では、圃場を耕し均平化を行う代掻きの作業の効率化にグリーンレーザを搭載した UAV (Unmanned Aerial vehicle) 測量を用いる。UAV を用いる技術は飛躍的に向上し、あらゆる場面で使用されてきた。近年、i-Construction の先駆けである ICT (Information and Communications Technology) 測量と呼ばれる、点ではなく面で行う測量が普及してきた。これまでは、一つ一つの点を繋ぐ測量が主流であり、時間や作業量が多く伴うものだったが、著しい測量技術の向上に伴い、面的に処理可能な測量技術が使用されるようになってきた。例えば土木業界では幅広い現場で活用されている短時間で広範囲を撮影することの出来るドローン測量や、地形データを短時間で捉える 3D レーザスキャナ測量などがある。こういった ICT 技術や UAV 技術を本研究では農業分野、特に水稻直播栽培の圃場不陸の均平化への活用を試みた。これまで UAV は、生育観測のためのマルチスペクトルセンサーによる植生指数に関する研究や、生育を促す農薬散布などの研究で主に利用されてきた。これまでの既往研究については第 2 章で整理する。



図 1.1-6 写真測量で使用されている UAV 機材

現在、農研機構の圃場不陸観測マニュアルによると、圃場の不陸計測は主に UAV 写真測量によって行われ 3 次元的に処理されている。しかし、農業特に水稻農業では水を張った圃場も対象となるため、写真測量だけでは水面下の地形まで把握することが出来ないのが均平化の課題となっている。このような課題を解決する手法として、UAV グリーンレーザ測量手法の提案をする。グリーンレーザスキャナは上空からグリーンレーザを地上に向けて照射し、反射してきたパルスを計測することで水面下の地形を計測可能などところに最大の特徴をもつ。地上から、湿った地面や水面下までのシームレスな計測が出来る。これまで、河川管理等の水部があり、水部の計測も必要な現場で研究や活用が進められてきた。短時間で広範囲の計測が可能な UAV と地上から水面下の地形を計測可能なグリーンレーザスキャナで、まずグリーンレーザスキャナの地上計測位置精度の検証を行った。そのあと、各圃場での地上段彩図等の作成した図面をもとに圃場の均平化を効率化に寄与できるか、検討を行った。グリーンレーザ搭載測量による計測手法の有効性について考察する。

1.2 建設分野の課題

島国である我が国は 35,000km もの海岸に囲まれており、図 1.1-4 に示すように諸外国に比べて国土面積当たりの海岸線の延長距離がきわめて長い。海岸は防護機能や海水保全・浄化機能、生態系保全機能、親水機能を有し、人々の暮らしに不可欠である。その一方で、海岸侵食によって毎年平均 160ha もの国土が失われており、2050 年には 2000 年時点の 1/4～1/2 の砂浜が消失するといわれている。海岸侵食は、波浪による冲向きと岸向きの土砂移動の土量収支バランスが崩れた時に海岸が削り取られ、汀線が後退することによって生じる災害である。我が国の沿岸域では、太平洋側、日本海側の別を問わず、外海に面する海岸では、特に 1965 年以降、海岸の侵食が目立ち始めた。図 1.1-5 に近年の主な海岸侵食被害を示す。海岸侵食が激化した要因としては、深海への土砂損失や、沿岸に建設された突堤や防波堤などの大規模構造物の影響による漂砂のアンバランスのほか、近年では、地球温暖化による海面上昇による海岸侵食が指摘されている。そのため、沿岸域では離岸堤や人工リーフをはじめとする海岸侵食対策工が全国に存在する。長い海岸線において対策工の状態や効果を把握するためには、海底や沿岸構造物の形状を効率的に把握することが重要である⁵⁾。

現在の海岸侵食対策工の点検は目視を主として行われており、調査期間の長期化や危険性が伴う。また、構造物の部位・部材が相互に関連しあっているうえ、これらに作用する外的要因が多種多様である。そのため、変状の発生・進行現象がきわめて複雑である。さらに、海中に設置さ

れた構造物も多く、これらを目視によって捉えることは非常に困難である。海底地形計測はマルチビームによる音響測深やALB(Airborne Laser Bathymetry)によって実施されているが、計測できない部分やコスト面での課題がある。また、図 1.1-6 に示すように、現在国土交通省では建設DXを推進している。これは、現在の建設現場の課題である人手不足や災害対策・インフラ老朽化に対応するための生産性向上を目指した i-Construction の推進と、Society5.0 等の技術革新の進展や新型コロナウイルス感染症の蔓延などの社会経済情勢の変化に対応するための、インフラ分野におけるデジタル化・スマート化の推進である。i-Construction とは一人一人の生産性を向上し、魅力ある建設現場を実現させるために国土交通省が実施している政策の一つである。特に ICT 技術の全面的な活用を推進しており、各工程において 3 次元でデータを管理することを目指している。そのため沿岸域では、ドローンやマルチビームを使用した、水陸一体のシームレスな測量が期待されている⁶⁾。

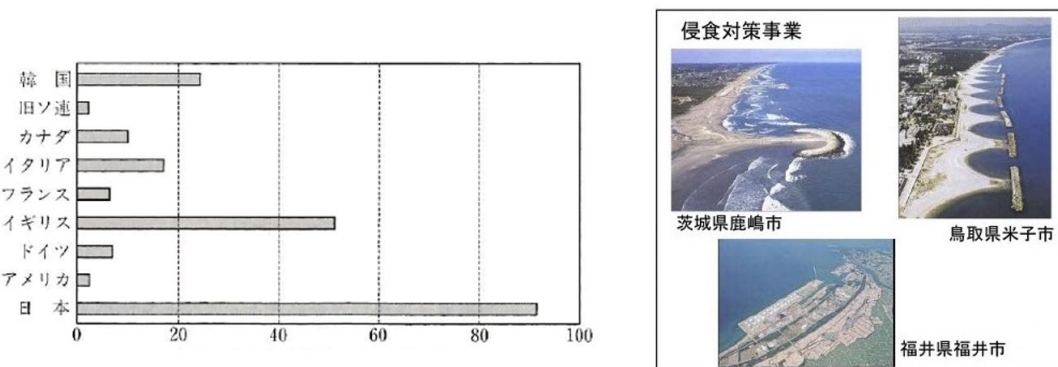


図 1.1-4 左：各国の国土 1km² 当たりの海岸線延長 (m)
右：主な海岸侵食対策工



図 1.1-5 近年の主な海岸侵食被害



図 1.1-6 国土交通省による建設 DX の取組
(国土交通省 インフラ分野のデジタルトランスフォーメーション施策一覧から抜粋)

さらに海浜の地形は、海域の砂が沿岸流や風波で移動することで変化する。海象が静穏な時に透明度の高い水域であれば、概略の地形形状を空撮で把握できるが、直接その水深の計測は出来ない。通常海域では音波を使った測深が行われる。測深区域に対して測線を設定し、その測線に沿って音響測深を行うシングルビーム深浅測量に代わり、近年では飛躍的に向上したコンピューター技術と GNSS 測位技術との組合せによるマルチビーム測深技術が導入され、測線に沿って帯状に未測深幅が発生する欠点を克服した面的な海底地形の把握ができるようになった。このマルチビーム方式であれば水深の最大 10 倍程度の面的な測深も可能である。しかし水深が m の遠浅部分は調査船が入ることが出来ないためシングルビーム深浅測量、あるいは海岸から測線に沿って移動する潜水夫の持つターゲットを陸上から計測することで、沿岸域の海底地形の測量が行われているのが実情である。こうしたこれまでの研究によって、図 1.1-7 に示すような海浜地形の一般的な地形が理解されてきた。ただしこれは空中写真判読や部分的な断面測量結果を総合して、概念図として描かれたものである。実際の海浜は動的な平衡状態にあり、常に海浜断面も変化し続ける。そのため、任意の時期におけるスナップショット的な正確な断面を捉えることは難しい。さらにその平面形状までも 3 次元的に計測することは、音響測深では現実的に困難であった。そこで水中を透過する波長をもつグリーンレーザを活用した ALB すなわち航空レーザ測深が最近活用されるようになったが、音響測深で観測されるような船舶の揺動の影響による平坦な海底地形がキャタピラのような凹凸を繰り返した地形となる課題や、送受波器直下の強反射エコーが両端部付近のエコーに入り込むトンネル効果などの誤差が ALB では発生しないので、広域の地形変化を高精度に計測する手法として期待されている。その一方で、ALB 計測に使用する航空機が固定翼あるいは回転翼であっても、高度数 100m という高い高度を時速 200km で移動しながら計測するため、高パルスレートのスキャナを使用しても、最大 20 点/m² 程度の点群密度の取得が限界となる。そのため、分解能として m 以下の高精度の地形把握は不可能である。さらに現状は数億円規模の LiDAR 機器を搭載しての計測となるため、計測費が高価となり、特に局所的な狭い範囲の計測手法としての普及が困難である⁷⁾。このような背景を鑑み、グリーンレーザスキャナをドローンに搭載して計測する LiDAR 測量システムの開発を試みた。ドローンは数 10m の低空からの計測が可能であり、またその操作性が容易なことから海岸管理者自らが実施することができ、計測の迅速化あるいは低コスト化が期待できる。本研究では、このドローン搭載 LiDAR システムの ALB 計測の代替としての活用が可能であることを実証するため、鳴き砂海岸の保全対策用の

各種データの取得を試みた。本論文でその有用性を考察し、今後の沿岸域の保全対策への応用を議論する。

1.3 本研究の目的と概要

本研究では、水稻の直播栽培における圃場不陸の均平化のための不陸計測を目的にグリーンレーザを搭載した UAV によるレーザ測量を行い、この計測が直播栽培において有益に活用することが可能か、また比較的新技術であるグリーンレーザの地上標定点を用いた精度検証、また実際にグリーンレーザが水面下の形状を捉えることが出来たのか、解析を行い、グリーンレーザ計測による計測手法の考察を行った。

また、目視による点検を実施している現状や建設 DX などの背景から、新たな手法として、グリーンレーザスキャナ搭載 UAV による海岸侵食対策工の 3 次元モニタリングの実施に向けて行った。沿岸域において UAV による測量を行い、ドローン測量の基本性能を把握するために 3 次元モデルを作成した。それらから断面図抽出による検証、測深深度と点密度の関係の把握、潜堤の形状把握を行った。さらにスキャンマッチング手法を応用し、2 時期間における消波ブロックの変状抽出を行った。それらの結果から沿岸域におけるドローンの活用方法と今後の課題について考察した。

図 1.1-7 に 本論の構成を示す。本論文は、農業分野と建設分野の DX の実現を図るセンシング手法を検討するものであり、前者は水稻の直播栽培を実現させるスマート農業への応用、後者は海岸保全事業の効率化のための沿岸域の計測手法への応用を図るものである。

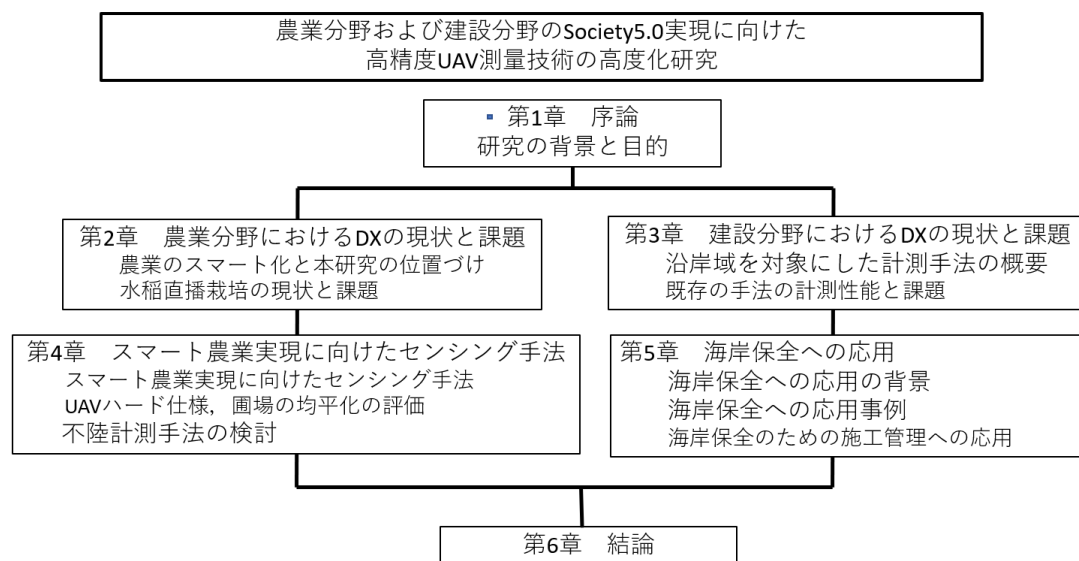


図 1.1-7 本論の構成

第2章 農業分野における DX の現状と課題

2.1 農業のスマート化と本研究の位置づけ

第1章で述べたように、日本の農業は農業従事者の著しい減少、また若者の担い手の農業離れによる労働力の低下・不足が深刻な問題となっている。過去5年の農林水産省の統計によると、2015年には基幹的農業従事者数（個人経営体）は176万人であったのに対し、2020年には136万人と、20万人も減少傾向にある。そのうち65歳上の割合は、2015年は64.9%であったのに対し、2020年には69.8%と、0.4%増加傾向にある。こうした問題を解決するために、外国人の受け入れ等、外部からの労働力の増加を目指しており、過去5年で2倍の増加傾向にあったが、近年はCovid19の影響により、外国人による労働力増加も見通しが立たない状況であり、今後の世界の社会情勢に左右され、期待できない。^{1) 2)}

農業はいわゆる第一次産業であり、現場では労働者の数とその労働技術が効率化に直結していることが多い。例えば、機械化が困難で人の手で作業に頼らざるを得ない場合には、危険な作業や体力的にきつい作業が伴う。日本の農業の多くは世襲制を取っていることも多く、新規農業従事者にこれまでの農業のノウハウが継承されにくく、新規で農業を経営し生計を立てていくには厳しい側面がある。また、農業従事者が減少する中、1人当たりの作付け面積は拡大し、トラクターの操作等の熟練者でなければできない作業も多く、若者や女性の参入が困難である。農業は農産物を育て、収穫することだけではなく、その後の農産物の加工や出荷に必要な選別等、多くの労働力に頼る作業もある。このような問題から、農業全体での省力化や労働力の確保、農業従事者の負担の軽減がこれからの農業の重要な課題となる。現状の農業の課題の解決策として、近年農業のスマート化、いわゆるスマート農業の研究が農林水産省や大学の研究所で行われており、実用化が進んでいる。その多くは人的な労働力で行ってきた農業の一部を、衛星測位を活用したロボットトラクタやロボット田植え期の導入、有人監視下における自動走行、ドローンや人工衛星によるセンシングデータの活用などの最新技術を用いてスマート化しようとするのがスマート農業である。これまでは、研究ベースで農業のスマート化が進んでいたが、第1章で述べたように2019年より全国の実際の現場で2年間の実証実験が進められている。農業のスマート化は農業従事者にとってメリットの大きいものだが、実際の現場ではまだまだ課題が多い。まずドローンやロボットトラクタなどのスマート農機は農業従事者にとって高価なものであることやそういった機材が中山間地域の小さな圃場に適していないこともあることからコスト面などといった課題がある。



図 2.1-1 スマート農業による効果²⁾

また、一部の地域ではスマートフォンによる GPS 機能が脆弱であることや棚田や大規模な営農など圃場の特徴は様々であることからスマート農機がうまく利用できない等のインフラ面での課題も挙げられる。最後に、操作面での課題で、どの機材も操作は簡単であるがうまく利用したり誤操作を減らしたりするにはノウハウや経験が必要となる。農林水産省によると、スマート農業を用いて、生産現場の課題を先端技術で解決し、農業分野における Society5.0(政府が掲げる、最新技術テクノロジーが進化した未来の形)の実現に役立てようと試みている。農林水産省の抽象的なスマート農業による効果は以下の3点に目標を設定している。^{3),4)}

2.1 作業の自動化・省力化について

作業の自動化・省力化を目指す中で、特に取り組むべき技術として以下の3点を農林水産省は掲げている。

- ・GPS 自動走行システム等を活用した作業の自動化
- ・手作業で行ってきた重労働の機械化・自動化
- ・ロボットと高度なセンシング技術の連動によつて省力化・高品質生産

自動走行のロボットトラクタ、スマホで操作する水田の水管理システムなどの活用で、農業の作業の一部の自動化を試み、労働力の省力化を可能にする。例えば、一人当たりの作業可能な面積の拡大、大規模化を可能にするために、畑を耕すのは無人自動走行トラクターで、播種は有人で行うなどの研究が進められている。自動走行トラクターにおけるシステムの導入のメリットとして、一人で複数台のトラクターの使用が可能になり人件費の削減や、限られた作期の中で一人当たりの作業可能な面積を増やし大規模営農が可能になる。現在、圃場で実用化されているロボットトラクタは有人の目視による監視の下での自動走行に限定されている。今後の作業の自動化・省力化を進めることで生産性向上を図るためには、有人の有無やその居場所にかかわらず、遠隔で操作ができるシステムと圃場間移動による連続的な自動化作業のシステム体系が必要となってくる。



図 2.1-2 無人で走行するトラクター（手前）²⁾

2.2 情報共有の簡易化について

位置情報と連動した経営管理アプリの活用、作業記録のデジタル化・自動化し、熟練者でなくとも、生産活動の主体になることを可能にする。データに基づく農業の実現には農業情報のデ

ータ化が必須となるが、これまで実証されてきたスマート化が個別に行われていることから、データやサービスの相互連携がないことまたデータの種類が多く散財しておりデータを生かしきれてない課題もある。農業の情報の共有やその簡易化のために、現在農林水産省ではオープン API (Application Programming Interface) の普及を推奨している。各スマート農機と圃場ごとの作業記録や分析のデータの連携は農業従事者にとって次期の営農計画等に有益に利用できる。こういったシステムはアメリカやドイツ、ヨーロッパでシステムが確立されつつある。そのような例を見習って日本でもオープン API の整備を進めている。一般的にオープン API とは、データの連携のための仕様を外部に公開し、条件の下で他のシステムとの連携をする仕組みのことをいう。農業オープン API は日本の農業従事者と農機メーカーがその情報を提供・管理し、営農の効率化を目的とするシステムである。こういったシステムを利用することで、農業の情報の蓄積を手作業ではなくデータとして保存・次期の営農計画に活用していく。

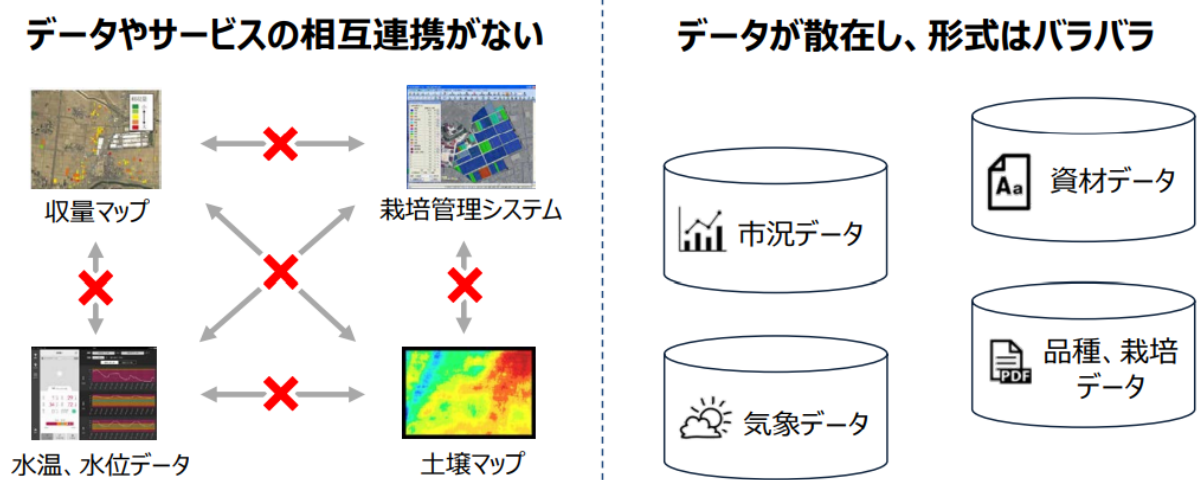


図 2.1-3 情報共有の簡易化におけるデメリットの例

2.3 データの活用・可視化について

ドローンや衛星によるセンシングのデータや、気象のデータ、AI (Artificial Intelligence) の解析により、農産物の生育状況の把握や病害虫を予測し活用・可視化することで、農業経営のスマート化を可能にする。生育評価のためのセンシングが盛んになっている。ドローンによるセンシングが一般的でなかった時代は、主に人工衛星による生育評価の研究が進められていた。近年では、人工衛星では補えなかった分解能でデータを取得することが可能になり、高精度・高密度な情報を得られるようになった。ここでは、真庭市のセンシングによる実証実験についての例を紹介することで、データの活用や可視化について記述する。同じ圃場で本研究も行われている。この実証実験でのセンシングの目的として、水稻の生育状況の把握を目的にセンシングを用いることで農業法人にとって大規模な圃場の管理の効率化が挙げられる。センシングを行う対象地域は、岡山県真庭市の中山間地域に位置する、図 2.1-4 の赤枠に示す。約 176000 m²の圃場となっており、大規模な圃場を農業法人 寄荏原が管理・営農している。計測は、7 月 20 日、8 月 17 日、9 月 29 日の日程で行ったものを使用する。



図 2.1-4 実証実験が行われている現場の対象地域（赤枠内）

稲の生育把握として，UAV 機材にマルチスペクトルセンサーと呼ばれる，物質の色の情報を取得するセンサーとオルソ画像作成の為にデジタルカメラを搭載して計測を行った．図 2.1-5 に示す．対象物から反射される波長は，物質や植物の状態によって異なり，遠隔から対象物の情報を得ることが出来る．実証実験で用いたマルチスペクトルセンサーは，青・緑・赤・レッドエッジ・近赤外の波長を得ることが出来るセンサーを用いた．

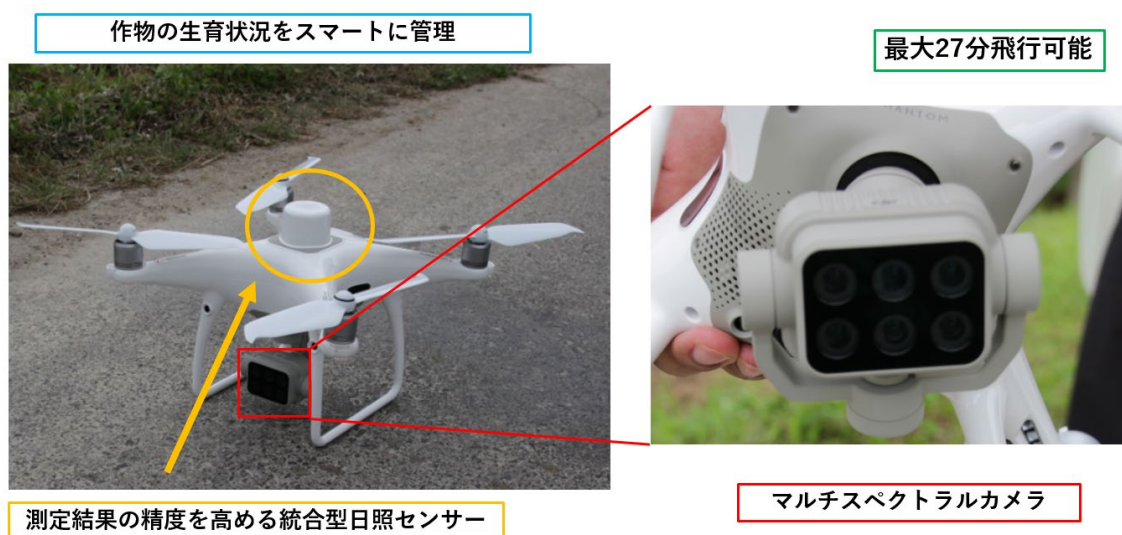


図 2.1-5 実証実験で用いた UAV 機材とマルチスペクトルセンサーの例

稲作の生育状況を把握するには，これまで農業従事者による手作業で主観的な判断でなされてきた．人による主観的な判断だと，人によって判断基準が違ったり，偏りが発生してしまったり

してしまう。また大規模な圃場だと時間も労働力も多く費やさなければならない。主観的な判断をカメラやセンサーにまかせることで、客観的に判断でき、また安易に圃場全体を管理する手立てとなる。特に植物の生育状況を把握するものとして植生指数と呼ばれる、植物の活力を表す指数を用いる。実証実験では、NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)と NDRE(Normalized Difference Red edge)を使用して、水稻の各生育ステージにおける生育状況を可視化し地図上に表した。解析には、Pix4D と呼ばれる、3次元点群データを作成することができる SfM(Structure From Motion)ソフトウェアと、データ化された情報を地理的な情報とともに視覚的に表すことの出来る GIS (Geographic Information System) ソフトである QGIS を用いた。

NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)は正規化植生指標とよばれ、可視光域の赤の反射率と近赤外の反射率の値で表され、植生指数の代表格である。式を以下に記す。IR を近赤外の反射率、R を可視光域での赤の反射率とする。

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R}$$

NDVI は一般的に $-1 < NDVI < 1$ の範囲の値を取り、1 に近づくほど植生が活性化しているとされ生育状況が良いとされる。一般的に、植生が多い部分ほど可視光域の赤の反射率は小さくなり、近赤外の反射率は大きくなる性質を持つことで、光合成活動が活発に行われているかを判定しているためである。

NDRE(Normalized Difference Red edge)は正規化レッドエッジ指数とよばれ、近赤外の反射率とレッドエッジの反射率の値で表される。以下に式を示す。IR は近赤外の反射率、Red edge はレッドエッジの反射率を示す。

$$NDRE = \frac{IR - Rededge}{IR + Rededge}$$

レッドエッジとは、赤から近赤外にかけて反射スペクトルが最大となる波長域のことであり、NDRE は葉緑素や肥料の含有量のなどを把握する植生指数である。特に、植生に高レベルの葉緑素の多い中期～後期の生育状況把握に有効である。圃場全体の NDVI と NDRE の植生指数 MAP を図 2.1-6 と図 2.1-7 に示す。比較用にオルソ画像を図 2.1-8 に示している。オルソ画像とは、複数の写真から写真上の物体の位置ずれを無くし、真上から見たような傾きのない画像に変換したものである。

NDVI・NDRE とともに緑に近づくほど生育状況が良く、赤に近づくほど生育状況が良くないことを示すように画像の作成を行っている。NDVI・NDRE 画像について、オルソ画像と比較して、稲作の各時期でのデータの取得画像の作成しており、またその傾向は似ている。一部、9月29日計測の NDVI・NDRE のデータが 0 に近づき、赤くなっている部分はすでに稲刈りが終わっているからである。拡大した一部の圃場の NDVI 値画像とオルソ画像との比較を図 2.1-9 に示す。この圃場についても、7月20日は全体的に 0.5～0.6 の黄緑色の値を示しており、NDVI 値とオルソ画像は同じような傾向を、3時期を通して示していることが分かる。9月29日の計測では、一部圃場の中で稲が倒伏している部分があるがこちらについてもオルソ画像と傾向は似ている。このような可視光の画像は、葉色診断に活用しやすく、ポイントごとの追肥に役立つ。今後、UAV 測量によるデータの取得とともに、実際の値との比較を行い、UAV データの精度の検証を行うための検量線の作成を行い、精度の検証を行っていく必要がある。

図 2-10 はオルソ画像と NDVI 値画像から、トビイロウンカと呼ばれる害虫の被害である坪枯れを可視化したものである。坪枯れとは、稲の重要害虫であるトビイロウンカが大量に稲に定住し、

稲の水分や栄養分を吸い取ることで枯死させ、圃田形状に倒伏してしまうことである。この画像は害虫による被害の具体的な例として示す。2種類の画像は、同じ圃場のものを比較しており、全体的に NDVI 値が 0 に近い値を示す赤色に近づく部分でトビイロウンカによる傾倒の被害を受けていることがオルソ画像を見ると分かる。このように、UAV 計測から得られた情報やデータは、ただ単に各時期における生育評価やその可視化に用いられるだけでなく、害虫による被害も視覚的に表示することが出来る。今後はこういったデータを用いて害虫による被害の予想の研究も進めていく。

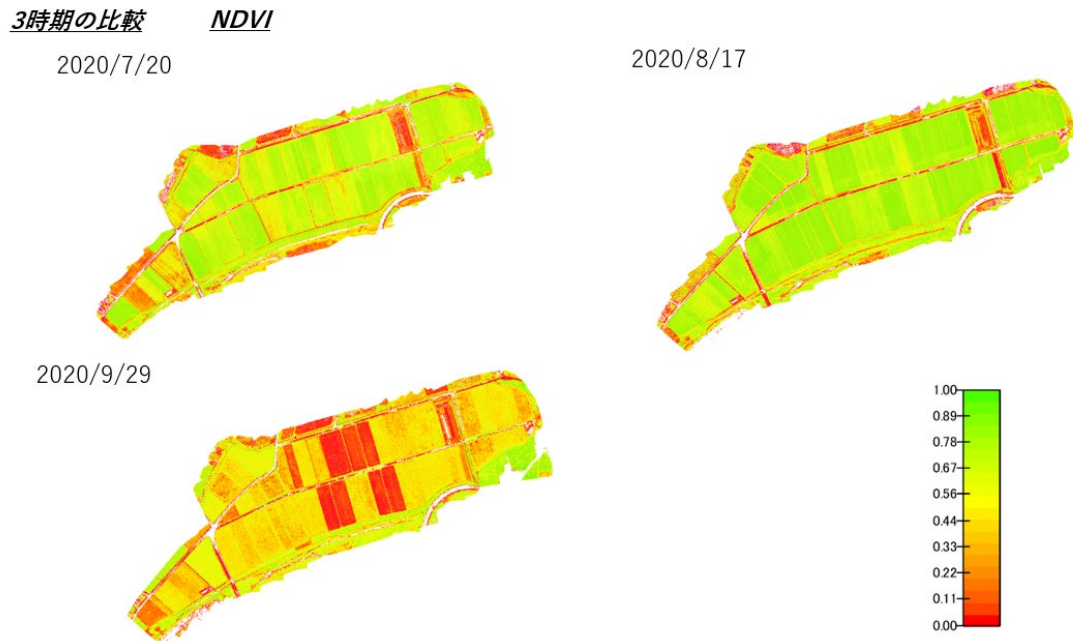


図 2.1-6 NDVI と呼ばれる植生指数で水稻の生育のデータを可視化した図

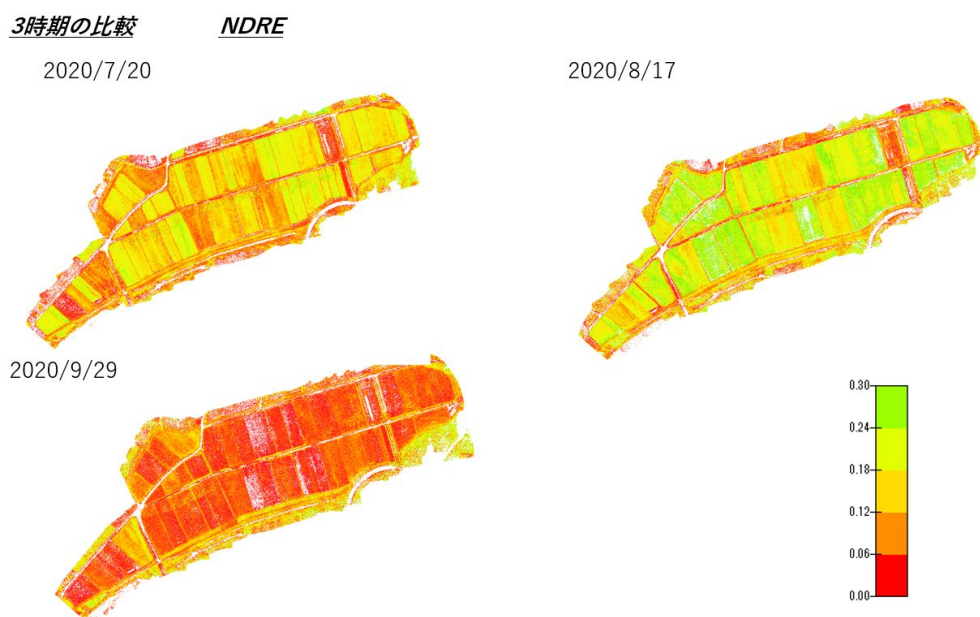


図 2.1-7 3 時期の NDRE 比較図

3時期の比較 オルソ画像

2020/7/20

2020/8/17

2020/9/29

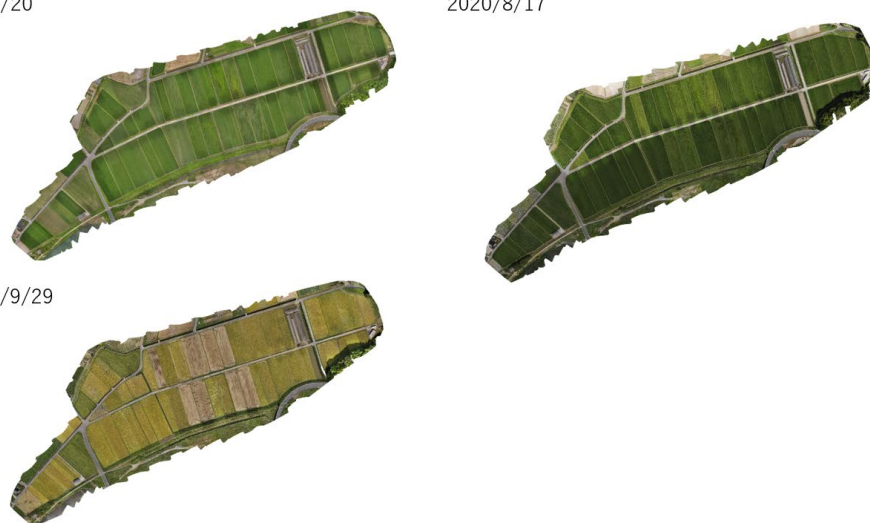


図 2.1-8 3 時期のオルソ画像の比較

NDVI

7/20

8/17

9/29

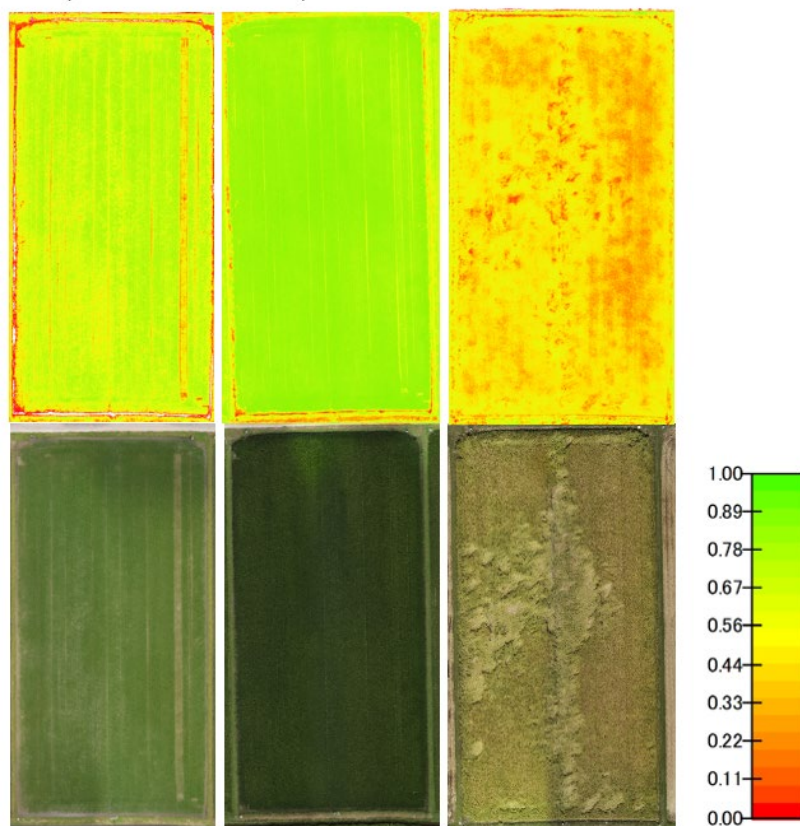


図 2.1-9 NDVI の圃場の拡大図

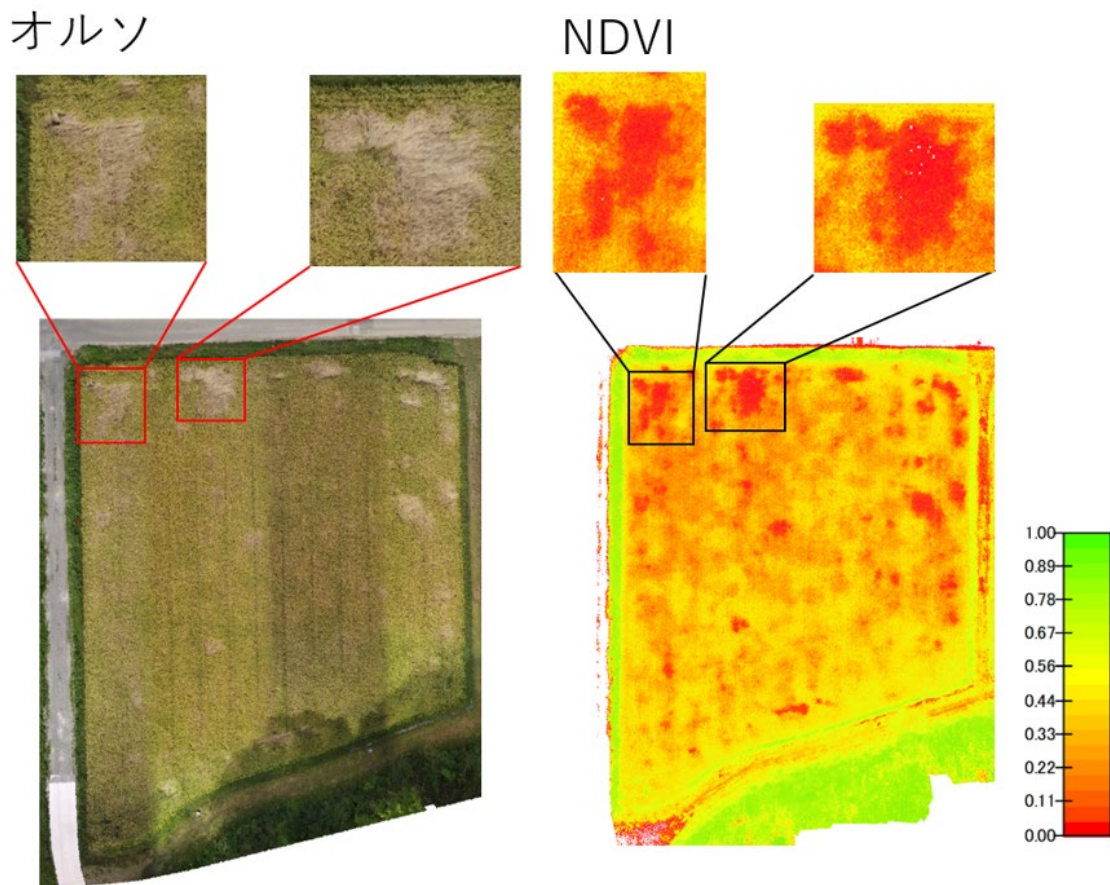


図 2.1-10 オルソ・NDVI 画像でわかるトビイロウンカの被害例

2.2 農業分野におけるセンシング技術

水稻の農作業に関する研究や実証実験は近年、企業や大学の研究で多く行われてきた。リモートセンシングを用いた生育観測のためのセンシングが研究の筆頭である。リモートセンシングとは、対象地域より離れたところからカメラやセンサーなどの機材を用いて光や音、温度などを計測する手法のことである。つまり、その物自体に触れずに調べることができる技術ともいえる。すべての物体はその物体の反射特性を有し、環境や条件により異なる性質を持つ。その特性を活かして物体の状態を詳しく知ることができる。一般に物質から反射・放射される電磁波の特性は、物質の種類や状態によって異なる。つまり、物質から反射・放射される電磁波の特性を把握することと、それらの特性とセンサーでとらえた観測結果とを照らし合わせることで対象物の大きさ・形・性質を知ることが出来る。地上のあらゆる物質には電磁波や赤外線・紫外線などをうけると物質の性質に応じて波長帯ごとに固有の反射の強さを示す。農業では、気象の情報や各波長帯の情報が非常に重要な役割を持つ。様々な農作物に対しての年間の気象の予測やそのデータは、播種から収穫まで、さらにその収量にも大きく左右する。リモートセンシングで使用されるセンサーには計測する電磁波の種類により、光学センサーとマイクロ波センサーの2種類に大別される。前者は可視光をはじめ、紫外線から赤外線までを含む波長帯域の電磁波を計測するものである。後者は長い波長帯域を計測対象とするため雲などの影響を受けずに地表面を計測できるという特徴があり、また波長によっては雨滴もとらえることが出来るため、降雨の観測などにも使われるが光学センサーよりも複雑なデータ処理が必要となる。リモートセンシングの歴史は古く、また人工衛星や UAV が使用されるようになってから革新的に技術が発展してきた。人工衛星には、

通信技術・通信衛星・放送衛星などの情報を伝えるもの、ナビゲーション技術・GPS 衛星などの位置を測るもの、リモートセンシング技術・地球観測衛星などの物を図るものの3つに大きく分類される。特に、人工衛星に専用のセンサーを載せ、地球を調べることを衛星リモートセンシングという。この技術の進歩により、人間の目では見ることが出来ない、部分的な遠隔操作だけではなく地球全体、地球以外の惑星に対する遠隔操作が可能になり、また長期的な調査もできるようになった。まだ UAV 機材によるセンシングが普及されていなかった時代は、このような人工衛星によって得られたデータ、特に電磁波を用いて、植物の生育評価を行ってきた。前述したように、地上にあるすべての物質からは電磁波が反射または放出されており、その電磁波は、物質の種類や状態によって各波長帯においてその強さに特徴をもつ。この特徴をもとに植生の生育評価を行う。例えば、日本の JAXA によって打ち上げられているひまわり 8 号や世界的に知名度の高い MODIS など人工衛星の使用がなされている。人工衛星は、直接的に労働力が必要なく、また定期的なデータの取得、幅広い範囲での観測が可能などのメリットがある。デメリットとしては、地上解像度が低いこと、天気によって左右される部分が多いことである。特に農業では、圃場が一つ一つ小さいこと、その小さい圃場の中の生育評価等を行いたいため、十分な地上解像度が得られなく、農業では課題が多い。近年、ICT 測定の普及が著しく、あらゆる分野で UAV 機材を用いた測定が行われてきた。ICT 技術については第 3 章で記述する。こういった技術は農業でもその効果が期待されており、UAV 測定を含む ICT 技術の農業分野での普及は今後の農業への課題の解決法として期待されている。UAV によるセンシング活用は、第 2.1 章で記述した通り、収穫時期の判断や生育状況の把握、また農薬散布への活用されている。近年は赤外線を検知するスキャナを用いた鳥獣害対策にも活用されている。UAV によるセンシングは、強風や大雨等の極端な天候の影響を受けないわけではないが、人工衛星に比較して高頻度・高精度の情報を得ることが可能であり、知りたいと思ったときに UAV を飛行させ観測することが可能であることから、その身軽さから農業の現場への実証が行われている。表 2.3-1 にスマート農業への観点からみたリモートセンシング技術の適正比較の例を示す。⁵⁾

表 2.3-1 スマート農業への観点からみたリモートセンシング技術の適正比較の例 8)

	UAV	人工衛星
観測範囲	数百 km ²	数 ha～数十 ha
空間解像度	1 ～ 8 m	数 cm～
計測頻度	数日に一度～	随時
適時性	天候に依存	機動性高
天候の影響	特に雲・大気の影響を受けやすい	豪雨や強風以外で計測可能

2.3 水稻直播栽培の現状と課題

水稻の収穫量は 1967 年、作付面積は 1969 年をピークに減少している。水稻の単位面積当たりの収入は栽培技術の向上により向上しているが、高品質生産への栽培方法の普及によりその伸び率は低い。稲作農業は、季節的な農作物と違って、前準備も含め種籾から収穫までおよそ一年かかる。水稻の栽培方法は大きく二つの方法に分かれており、苗床を用いた育苗による栽培方法と圃場に直接種をまく直播栽培方法の 2 種である。一般的に広く普及している手法は、育苗による

栽培法である．米作りのスケジュールを図 2.4-1 に示す．育苗は 4 月から 5 月の田植えまで計測して圃場とは別のビニールハウス等で栽培が行われる．⁶⁾

	前年11月 ～翌年3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
	田んぼの準備	育苗・田植え	管理				収穫	
作業	土づくり 堆肥散布 肥料散布等	播種 育苗	代掻き 田植え 雑草防除 畦畔管理	中干	穂肥 畦畔管理	出穂 開花 畦畔管理	落水 刈り取り 乾燥 調整	乾糧調整 出荷作業

図 2.4-1 米作りのスケジュール

育苗による栽培は，水稻の苗をビニールハウスなどで栽培しその苗を田植えし稲を育てていく方法である．育苗期の環境や適切な管理は，そのあとの田植え後の成長に影響を及ぼすことから，米の高品質生産への非常に重要な役割を持つ．この手法が幅広く採用されている理由としては，春季は気候の変動が大きい時期であり，その時期にビニールハウス等の一定の環境を保つことの出来る環境下で抵抗力の弱い苗を生育することが可能なこと，また，均平化作業(代掻き)後に繁茂する雑草より生育がある程度進んだ苗を植えるため，雑草が制御しやすいところなどにある．

近年，農業の課題を鑑み，4－5 月の春期において効率的で省力化が可能な直播栽培の注目を浴びている．第一章で述べたように，直播栽培は種籾を直接水田に播き，苗立ちを待つ方法である．

直播栽培は，作付面積が大きくなればなるほど育苗と田植えの負担は重くなることから，ビニールハウスなどでの育苗や田植えの省略，またその省力化出来た時間で他の農作物に集中することができるとにメリットがある．直播栽培にも 2 種類あり，乾いた圃場に直播播種する乾田直播と，入水した圃場に直接播種する湛水直播栽培とがある．農業従事者にとってのメリットは大きい，直播栽培が普及されていないのには課題が多くあるのが現状である．米の播種は気温や降雨に左右されやすく苗立ちが難しく，苗立ちが減ると米の収量の低下につながる．育苗による栽培に比べ，直播栽培の米の収量は一割程度低下する．また，種籾を直接圃場に播くためスズメなどの鳥獣に食べられてしまい，苗数自体が減ってしまう．圃場に不陸があると凹部には水がたまり生育の阻害や苗立ちが悪くなり，凸部では湛水しても除草剤の効き目が悪くなり雑草の繁茂に繋がってしまう．水稻直播栽培の環境条件を最適化・均質化することでこれらの課題の解決になるとされている．以下にその取り組みの例を示す．⁷⁾

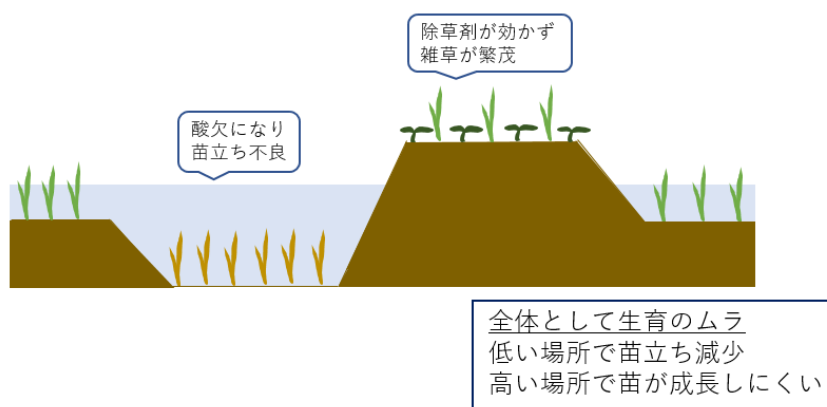


図 2.4-2 圃場不陸で発生する問題の例

①出芽・苗立ちしやすい品種の利用

米の品種によっては、苗立ちが直播栽培では難しいものもあることから、コシヒカリ等の比較的出芽・苗立ちしやすい品種の選択を進めている。

②鉄コーティングによるスズメによる食害を防ぐ。

浸種した種子に鉄粉と焼石膏でコーティングし、表面を硬くさせることでスズメの食害を防ぐ取り組みである。ここで浸種とは種粒を一斉に発芽させるために必要な水分を吸収させる作業のことである。鉄コーティングは、コーティングをすると長期間保存が可能であるため、冬などの農作業の閑散期に行うことで、春期の作業を減らすことが出来、労働の分散にも効果的である。



図 2.4-3 鉄コーティング作業（上）と鉄コーティングされた種子（下）

③UAV 写真測量を用いた圃場の均平化への測量技術の活用

農地の不陸の計測には UAV の前に、航空機 Lidar 測量が用いられていた。地上での計測では、圃場を格子状に区切り、1 m²に数点の密度で計測を行っていくため、点ではなく面的な状態での計測が可能である。UAV 測量による不陸の計測は、航空機 Lidar 測量と比較して、さらに高密度の計測が可能である。従来の UAV 測量による不陸の観測は、UAV 写真測量の技術と SfM (Structure from Motion) の技術を組み合わせて行うものである。一般的に、写真測量では複数の写真の重複部分の微小な見え方や特徴の違いを計測する。取得した画像の重複部分から特徴点を自動的にソフトが抽出し、カメラの位置や方向を推定する SfM と、3 枚以上の画像の重複部分からステレオ視を行う MVS (Multi-View Stereo) を利用することで 3 次元モデルの構築を行い、圃場を 3 次元的に表すことができる。農研機構 石塚らは、こういった UAV 写真測量の技術を用いて、被災農地での研究を行った。¹²⁾ 地震等の災害により農地に大きく不陸が発生した時に、その不陸の程度によって修復作業が異なってくる。既往研究では、2016 年 4 月に発生した熊本地震での不陸被害への修復作業のため、UAV 写真測量をもちいた調査を行った。石塚らによると、UAV で計測した不陸の程度は、航空機 LiDAR 測量と比較しても、有意な差が認められない精度を有していると記述している。UAV による不陸計測は、不陸計測にも適応しており、計測コストが航空機 LiDAR 測量の約 1/3 であることもメリットであると示している。

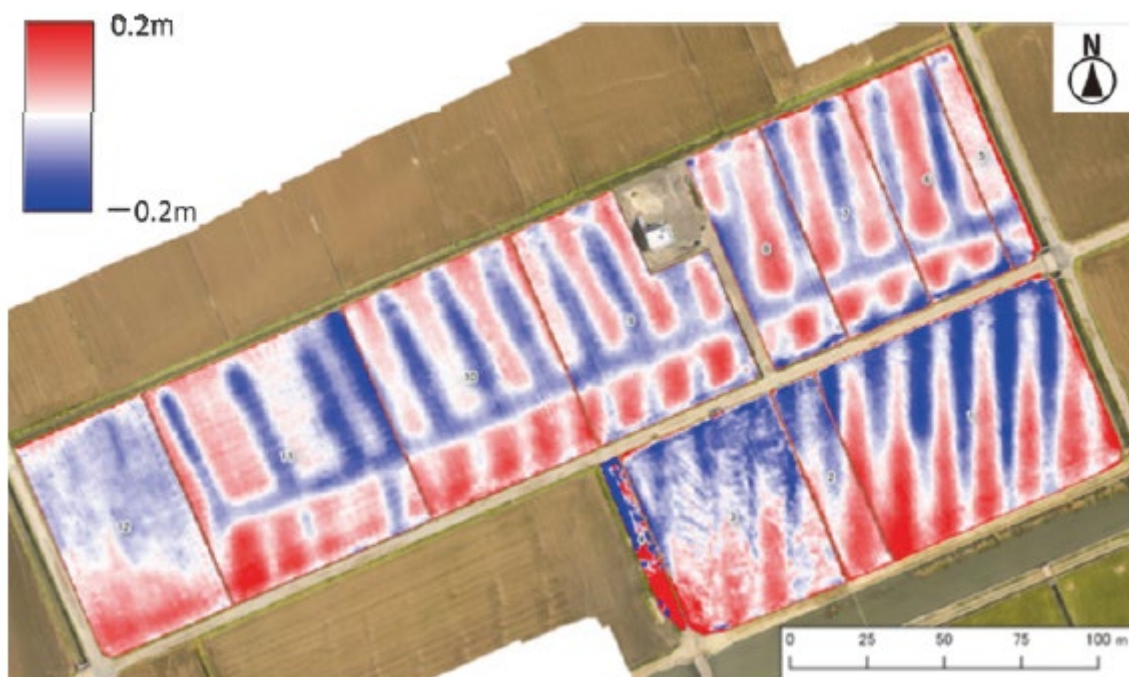


図 2.4-4 石塚らによる UAV 圃場不陸計測での計測結果
農研機構 石塚ら¹²⁾

2.4 圃場不陸についての既往の研究と現状

2.3 で記述したように、実際の農業の現場においても、UAV を用いた不陸計測への研究が行われている。入水していない圃場では写真測量は効果的だが、入水している圃場では水面下までの地形は計測することが出来ない。水稻栽培では、均平化作業の前後で入水する作業があるため、入水した状態での均平化作業は困難であり、熟練者でも難しい、またその作業には労力が伴い、作付面積が広いほど難しい。一般的に均平化の作業は、代掻きと呼ばれ、圃場に水を入れて土を碎き均平にする作業のことであり、稲を育てる土台を整える意味で稲作農業の中でとても重要な役割を持つ。代掻きによって得られる効果は均平化だけではなく、雑草を埋め込むことで雑草の繁茂を防いだり、土が細かく碎かれることで苗が育ちやすい環境を構築できたりと多くのメリットがある。代掻きは均平精度を高めるために複数回行う必要がある。最初に大まかに耕し、次は丁寧な耕す。一度目に行われる代掻きを荒代や荒代掻き、2 度目に行われるのを本代や精密代掻きと呼ばれる。代掻きの回数は圃場がどの程度荒れているかによって決まる。2 度目の代掻きで精密度を高めるには、一度目の代掻きとともに一度目の代掻き後に圃場全体の代掻きの効果による圃場の不陸の程度を事前に把握することが重要である。

これまで一般的に均平化作業には、レーザ均平機を用いて均平化作業が行われてきた。レーザ均平機とは、水平に照射されたレーザ光を基準にして排土板を一定の高さで走行することで圃場を均平化する機械のことである。ここでの排土板とは、レーザ均平機に取り付けられた圃場の土の高さを調整する板のことである。既往の研究では、水稻直播栽培に対して、これまでレーザ均平機による均平化作業が慣行的に行われていたため、レーザ均平機による均平化の必要性の議論がなされておらず、その作業の必要性の検討を論じている。レーザ均平機を用いることで、単位面積当たりの作業効率が 1/2 以下に減少させることができ、また均平化の精度も向上させ、その後の均平精度の低下も見られず、レーザ均平機を使用することの必要性を示している。しかし、圃場に高低差の大きい箇所が点在すると、レーザ均平機の凹凸部分が大きいと処理しきれない特

徴を考えると、大きな運土仕事求められる圃場ではレーザ均平機の仕様に工夫は必要となる。レーザ均平機の前に大まかに圃場の凹凸を減らす作業である、レーザプラウ耕での高低差の程度を抑える必要である。プラウ耕とは、残ってしまっている刈り株を完全に反転させ土中に埋没させ、その後の均平化や播種作業の妨げとならないようにするための整地作業のことである。¹³⁾ このようなレーザ均平機やレーザプラウ耕での作業の効率化にむけて、作業の前後で、グリーンレーザ UAV 測量を行い圃場の凹凸を可視化することでピンポイントな凹凸の箇所を判断できることで重点的に均平化作業が行えるのではないかと考える。

農研機構による圃場不陸マニュアルでは UAV による写真測量で圃場不陸の計測方法がまとめられている。このマニュアルの作成のきっかけとなったのが 2.4 で記した石塚らの既往研究である。圃場の対象として、UAV での写真測量を行った後、地上の基準点 (Ground Control Point) の測量を行う。その後、撮影データと基準点の測量データから、標高データを作成し、GIS ソフトで不陸量の標高段彩図の作成を手順としている。図 2.4-5 に作業手順のフローを示す。このようなマニュアル・作業手順を踏み、現在農業分野での圃場不陸計測は写真測量を用いて行われている。

8)

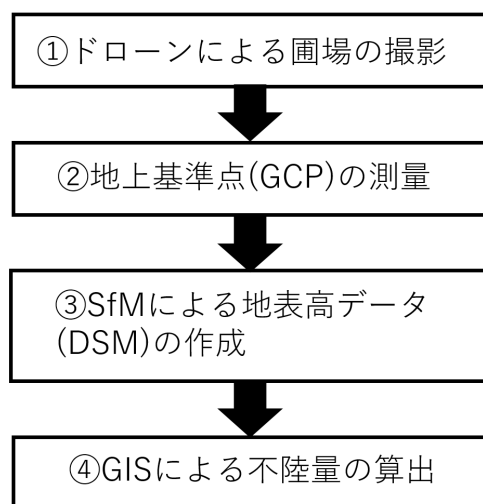


図 2.4-5 圃場不陸マニュアルによるドローンを利用した不陸計測の作業手順

2.5 ICT技術を活用した測量技術

土木業界は、労働力不足が著しく、そのため、少人数で効率的な技術が求められており、国土交通省では建設現場の効率化等の生産性の向上を目標として、ICT (Information and Communication Technology) と呼ばれる情報通信技術はあらゆる場面・分野での活用する取り組みである i-Construction の推進をしている。図 2.5-1 に示すのは、国土交通省による ICT 技術の全面的な活用の概要である。従来の施工と比較して、ICT 活用工事は 3 次元モデルの活用が整備されている。土木業界の現場では、すでに ICT 技術の導入は全国各地で進められており、これからの普及に期待がされている。ICT 技術は測量分野においても、面的なデータの活用が可能な 3 次元点群データの取得のためなどで用いられている。⁹⁾

ICT技術の全面的な活用(土工)の概要

ICT施工技術の活用推進

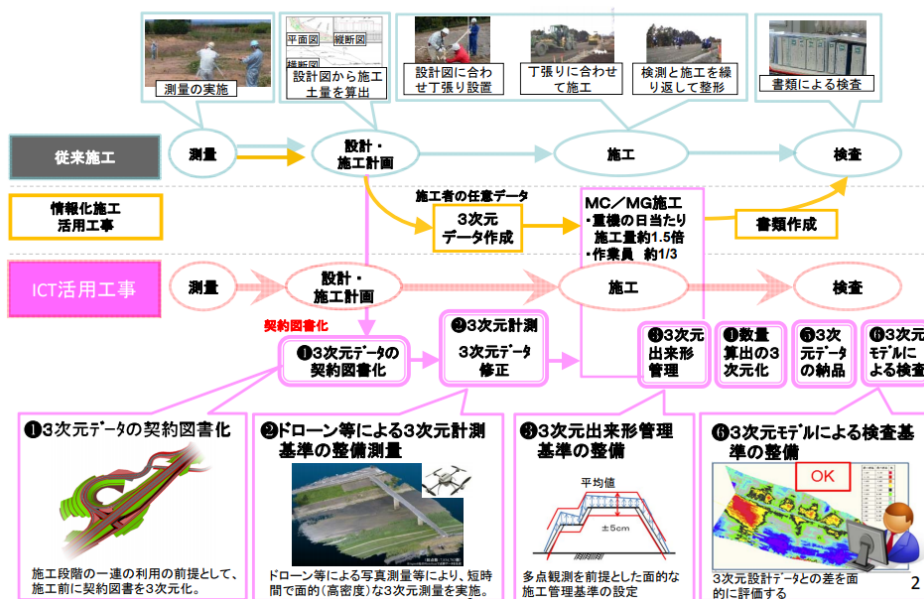


図 2.5-1 国土交通省による ICT 技術の活用概要

これまでの TS（トータルステーション）などの地上測量では、一般的に点として計測される大量のデータを集計し処理するものであり、多くの時間と労力が必要な計測方法であった。点から面で行う測量が普及し、面的な測量にシフトしつつあることで、時間の短縮と労働力の短縮・減少を達成することが可能である。例えば、図 2.5-2 に示す地形データを短時間で捉えるレーザ測量や、上空から短時間で広範囲をとらえることの出来る UAV 測量などがある。



図 2.5-2 河川の現場で使用されるグリーンレーザ搭載 UAV 計測

レーザ測量には、対象の地域や現場に合わせて、MMS (Mobile Mapping System) や ALB (Airborne Lidar Bathymetry) 等の方法で普及されている。これまで活用されてきた代表的な ICT 技術を用

いた測量手法を以下にまとめる。

1) MMS (Mobile Mapping System: モービルマッピングシステム)

3次元レーザ計測機械とデジタルカメラを車に搭載し、走行しながら効率的に主に道路の3次元点群計測を行う。これまで道路の維持管理や点検のための調査は、技術者の手作業によって撮影が行われており労力が伴うものだったが、MMSの登場により、より効率的な調査が可能になる。

2) ALB (Airborne Lidar Bathymetry)

ALBは近赤外と緑色のレーザ、デジタルカメラを航空機に搭載し測量を行うことで、近赤外は地上の3次元データ、緑色のレーザは水部の3次元データを取得することが出来、陸部から水部までの3次元地形の取得が出来る。ALBによる測量は主に水部を持つ河川や港湾で行われている。

3) SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)

GNSSを使用せずに自己位置推定と環境地図の作成が出来る手法である。これまで、自己位置推定の為にGNSSを搭載した手法が確立されていたがSLAMの登場によって、屋外だけではなく屋内や植生の3次元データ計測が可能となる。

4) UAV 測量

UAVにデジタルカメラやレーザスキャナ、マルチスペクトルセンサーなどを搭載し上空から地形情報を得る測量技術である。土木工事の進捗状況などには写真測量が、植生や水部がある場所や工事の起工測量にレーザ測量が行われている。比較的操作が簡単で短時間で広範囲の計測が可能、また人が入れないような危険な場所でも使用できる。

2.6 農業へのUAV技術の適用

農業分野にUAVが活用されるようになってから、その利用者は急激に拡大しており、特に農業用UAVの機体登録数は2017年3月から2018年6月までの約1年3か月で約6倍にも上る。図2.6-1に示すように、同期間におけるオペレーター数も約5.5倍となるなど、農業分野へのUAVの導入は急速に進んでいる。^{10) 11)}

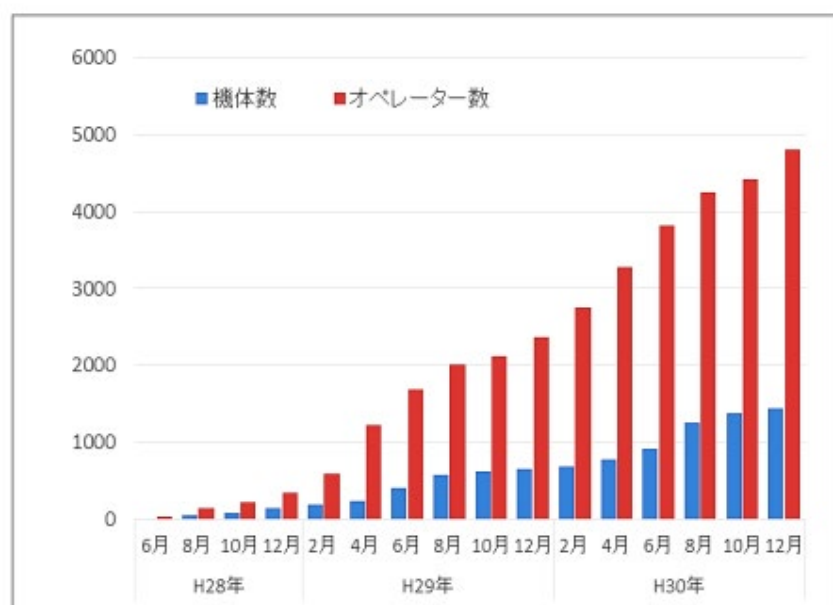


図 2.6-1 農業用 UAV の登録機数の変遷

農業分野における ICT 活用は主に 5 つに分類される。経営データの管理，栽培データの活用，環境制御，自動運転・作業軽減，センシング・モニタリングである。農業において UAV の活用は主に農薬散布や生育状況のセンシングなどで進められている。特に，零細圃場や傾斜地などでも日本の農業が抱える課題に対応し作業の効率性を高めると期待されている。農業用 UAV は，圃場の管理の効率を上げ，肥料のピンポイント散布による生産性向上といった，農業経済の成長媒体につながると期待されている。農林水産省は，農業用 UAV の普及計画として，水田を中心として UAV 利用の作付面積の半分以上の利用，中山間地域においての利用の体制を整えることを，2021 年までに実証実験と市販化，2022 年まで実際の農業の現場への普及を計画している。以下に UAV を用いた主な農業活用についてまとめる。^{12) 13) 14)}

(1) 農薬散布

国内で水稻を主として約 2.7ha で UAV による農薬散布が実施されている。今後は中山間地域や小規模圃場での利用の拡大にも期待されている。島根県の中山間地域で行われた UAV をもちいた農薬散布の実証実験では，導入前は各農家で実施していた農薬散布を，農薬散布チームを結成することで農家の負担が軽減された。この中山間地域での集落では継続して UAV による農薬散布が行われることとなり，次世代への継承も進められている。

(2) 病虫害管理

これまで目視でも把握することの出来なかった果樹の上部や急傾斜地での農業において，病虫害に発生を把握することが出来る。病虫害の発生の把握だけではなく，UAV による農薬散布技術の開発も進められており，散布時間の削減につながるとされている。

(3) 生育状況センシング

UAB にマルチスペクトルセンサーなどのセンサーを搭載することで，水稻の生育状況の把握を行う。圃場の可視化を行うことで，追肥の判断や圃場間の生育状況の比較に役立てている。生育状況のデータは蓄積することで翌年以降の農業にも役立てることが出来，生育不良の場所にのみ追肥することで生育のムラをなくせることまた肥料のコスト削減にもつながる。

(4) 鳥獣害対策

写真測量の技術や赤外線のカメラの技術により，鹿やイノシシの生育状況や害について把握する研究が行われている。また，鳥獣の生育地域の把握や，鳥獣の追い払いの技術についても研究が進められている。

図 2.6-2 はセンシングのフリー図である。

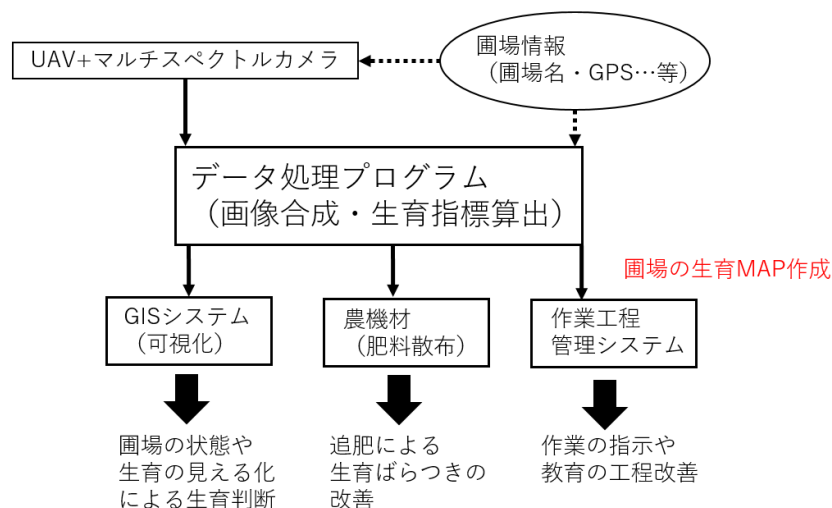


図 2.6-2 農業分野におけるセンシングのフロー

第3章 建設分野における DX の現状と課題

本節では ALB 測量および既存の海底地形測量の概要を述べる．まずあらためて ALB 測量およびナローマルチビーム測深の概要を記述し、海底地形計測データを実食した例を記述する^{1),2)}．

3.1 沿岸域を対象にした計測手法の概要

ALB (Airborne Laser Bathymetry) とは、航空機を用いて水底地形を計測することが可能な航空レーザ計測システムであり、航空レーザ測深機と呼ばれる．航空レーザ計測システムは、航空機から地上に向けレーザを照射し、地表面で反射してきたレーザ反射位置の三次元座標位置を求めるものである．この技術は、GNSS、IMU、レーザ測距装置 (レーザースキャナ) の3つの技術を融合することで成り立っている．

- ①GNSS (地上及び航空機)・・・3次元空間位置 (X,Y,Z) の特定
- ②IMU (慣性計測装置)・・・航空機の3軸の回転および加速度の検出
- ③レーザ測距装置・・・ノンプリズム型パルスレーザ測距儀

これまで使用されてきたレーザ測距装置の多くは近赤外レーザを用いている．しかし、近赤外レーザは水中をほとんど透過しないため、航空レーザを用いた水面下の計測を行うことができない．それに対し、ALB は図 3.1-1 に示すように近赤外レーザとグリーンレーザの2つを搭載している．グリーンレーザは水中を透過する性質を持つため、ALB を用いることで航空機での水中部を計測することが可能となる．図 3.1-2 に示すように、ALB は陸上部と水面を近赤外レーザで計測し、水中部をグリーンレーザで計測する．この2つのレーザを同時に照射することで、水面反射するパルスの往復時間と水を透過し水底で反射するパルスの往復時間差から水深を算出し、陸上部と同時に水中部の3次元座標を計測することができる^{3),4)}．

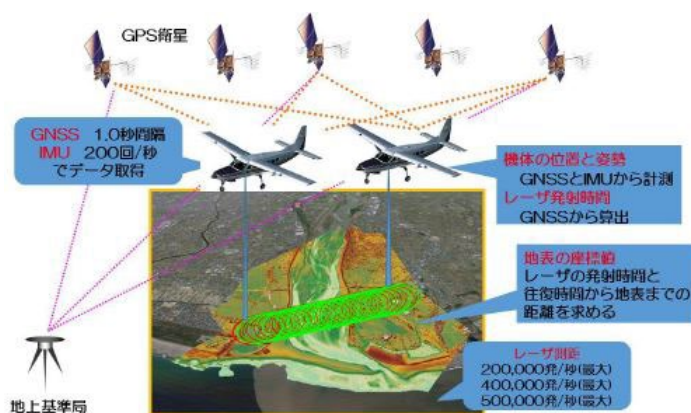


図 3.1-1 航空レーザ測量の概念図



図 3.1-2 ALB に搭載されているレーザ測距装置と計測状況

ナローマルチビーム測深機は、船舶に取り付けたソナーヘッド(送受波器)から音波を送信し、海底に反射した音波を受信するまでの時間を測定して反射面の3次元データを取得するものである。ナローマルチビームによる海底地形計測の概念図を図 3.1-3 に示す。本研究で使用了データはナローマルチビーム測深器 Sonic2024 によって計測されたものである。Sonic2024 は左右に広がりを持った扇形ビームで海底を面的に測量することができ、1 回の送受信につき 256 個のデータを取得できる。全体で $10^{\circ}\sim 160^{\circ}$ の可変の拡がりを持った扇形となり、海底を面的に測量することができる。システムは大別すると GNSS 測量、測量船の姿勢計測(動揺補正・方位補正)、音響測深の3つで構成される。

①GNSS(地上及び航空機)・・・3次元空間位置(X,Y,Z)の特定

②動揺計測装置・・・・・・・・・・測量船のロール(横方向の揺れ)、ピッチ(縦方向の揺れ)、ヒープ(上下動)、船首方向の測定

③音響測深装置・・・・・・・・・・マルチビーム方式による面的な水深値(Z)の取得

マルチビーム測量は、深部の海底地形計測を行うことができ、水深 7000m の深海の海底地形計測ができる機器もある。しかし、船舶による計測であることから、浅瀬や岩礁といった場所での計測は困難である。

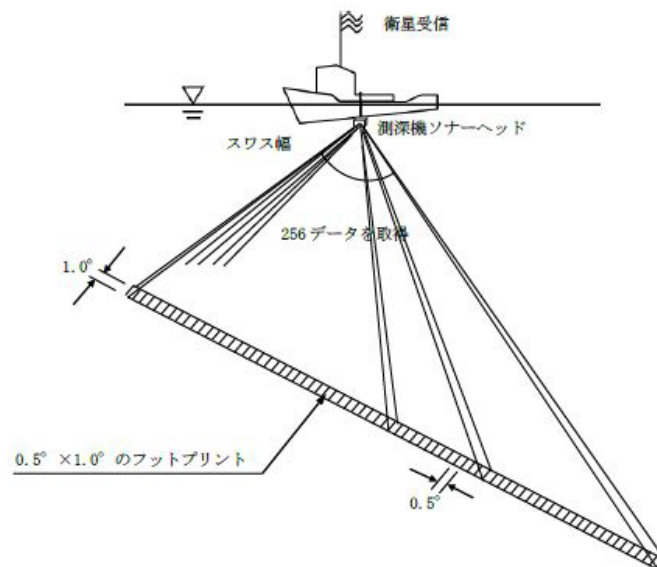


図 3.1-3 マルチビーム測量のイメージ

図 3.1-4 に示すシングルビーム測深システムは、測量船から海底に向け音波を発信し、海底面で反射して帰ってくるまでの音波が往復に要する時間をもとに水深を計算で求めるものである。図にあるように、マルチビームと異なり線的な計測となる。この技術は、GNSS 測位システム、音響測深機の技術を融合することで成り立っている。

①GNSS・・・・・・・・・・平面位置(X,Y,Z)の特定

②音響測深装置・・・・・・・・・・周波数 200kHz 仮定音速 1,500m/s

間接水準測量は、図 3.1-5 に示すように観測区間の両端に固定点を設け、鉛直角観測と距離測定を行い、その後高低計算によって未知点の標高を計算し算出するものである。

これらの計測手法は、マルチビーム測量が船舶であることから計測できない浅瀬や岩礁においておこなわれる。しかし、この2つの手法は面的な計測をすることができない。

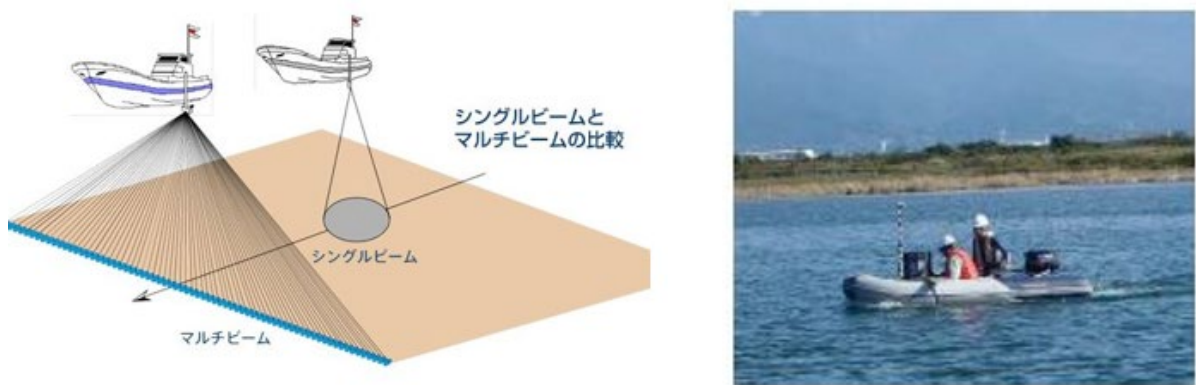


図 3.1-4 シングルビーム測定の概要

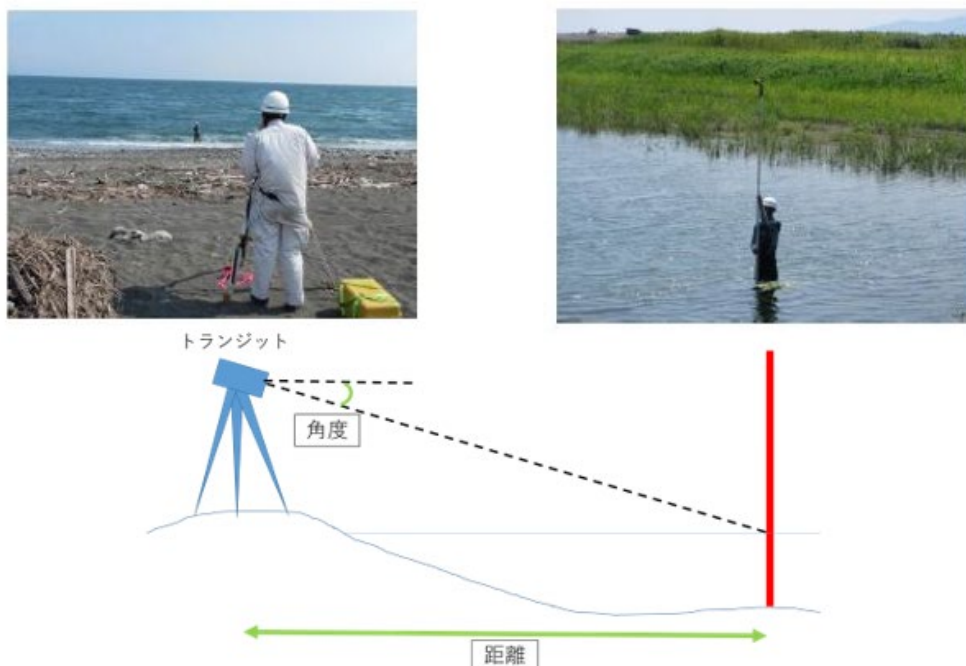


図 3.1-5 シングルビーム測定の概要

本研究では、これら ALB およびマルチビーム測深を実施した駿河・蒲原海岸測量および富士海岸横断深浅における計測のデータを使用し精度等の実用化の検証を行う。まず駿河海岸の計測の範囲を図 3.1-6 に、富士海岸の計測の範囲を図 3.1-7 に示す^{5),6)}。

また ALB 計測に用いたレーザ機器の性能を表 3.1-1 に、ALB 測深データ 3 の計測計画を表 3.1-2 に、また航空レーザ測量機に搭載されている IMU の性能を表 3.1-3 に示す。さらに、ALB に搭載されているレーザ機器と IMU 計測器を図 3.1-8 にそれぞれ示す。

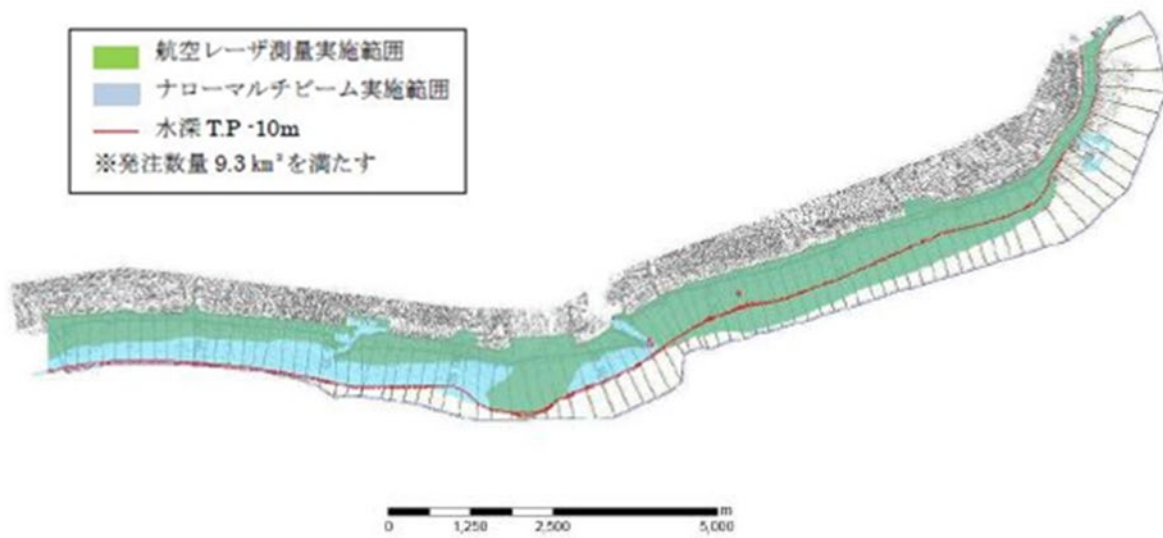


図 3.1-6 駿河海岸計測範囲

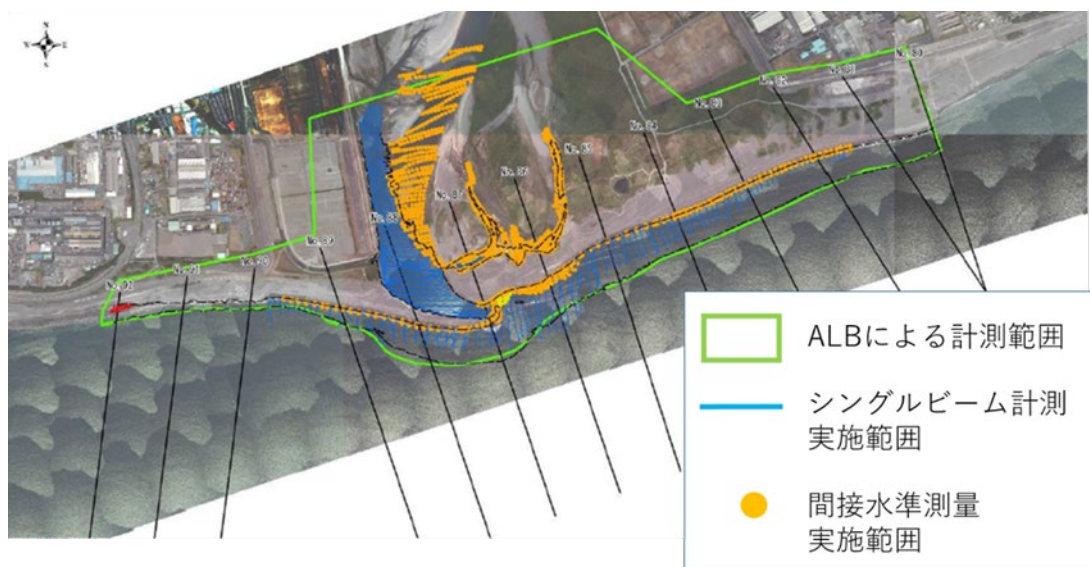


図 3.1-7 駿河海岸計測範囲

表 3.1-1 ALB レーザ機器の性能

機器名	Chiroptera II	
レーザークラス	Class4	
飛行速度	120knot～（220km/h）	
レーザーパルス数	緑	35,000発/秒（固定）
	近赤外線	500,000発/秒（最大）
飛行高度	水部・陸部計測	400～1000m
	陸部計測	400～1600m
測量精度	平面（X,Y）位置精度	RMSE=0.3m以内
	高さ（Z）位置精度	RMSE=0.15m以内

表 3.1-2 ALB の計測計画

対地高度		500m
対地速度		220km/h（120knot）
測点密度	緑	1.0m×1.0mに1点
	近赤外線	0.5m×0.5mに1点

表 3.1-3 ALB に搭載されている IMU の性能

速度	0.05（m/s）
ロール	0.005(deg)
ピッチ	0.005(deg)
ヘディング	0.008(deg)



図 3.1-8 レーザ機器（左図）および IMU 機器（右図）

3.2 既存の手法の計測性能検証実験

本検証では、ALB 測量の深さ方向（Z 方向）について、マルチビーム測量データとシングルビーム・間接水準測量データと比較して較差を導出する。較差はそれぞれの点群の Z 座標の差の絶対値と定義し、較差平均は次の式にて算出した。マルチビーム測量データは面的なデータであるため、1mメッシュのグリッドデータを使用して検証を行うこととし、シングルビーム測量と間接水準測量は線的なデータであるため、比較用測線を選定し、線上の点群データでの比較を行うこととした。

$$\text{較差平均} = \frac{\sum | \text{ALB計測によるZ座標値} - \text{比較対象計測によるZ座標値} |}{\text{比較点数}}$$

マルチビーム測量について駿河海岸と富士海岸の2か所のデータで検証を行った。駿河海岸ではALB測量による点群データとマルチビーム測量による点群データのうち0.23 km²あたる233112点で検証をした。また富士海岸ではALB測量による点群データと計測されたマルチビーム測量による点群データのうち0.13 km²にあたる130512点で検証をした。計測データおよび比較結果を表3.2-1に示す。精度検証の結果、駿河海岸のZ座標値の較差平均が0.03m、富士海岸のZ座標の較差平均が0.09mと算出できた。

表3.2-1 計測データの詳細と比較結果

	駿河海岸	富士海岸
比較面積 (m ²)	0.23	0.13
データ個数 (個)	233112	130512
標高の範囲 (m)	-8.05-10.24	-1.18~-6.43
較差の平均 (m)	0.03	0.09

シングルビーム測量については富士海岸のみで検証を行った。比較したデータの範囲は図3.2-1に示す。富士海岸ではALB測量による点群データとシングル測量と間接水準測量による点群データのうち、21本の比較用測線を選定し、その線上の点群データ1196点で検証を行った。計測データ及び比較結果は表3.2-2に示す。精度検証の結果Z座標の較差平均が0.06mと算出できた。

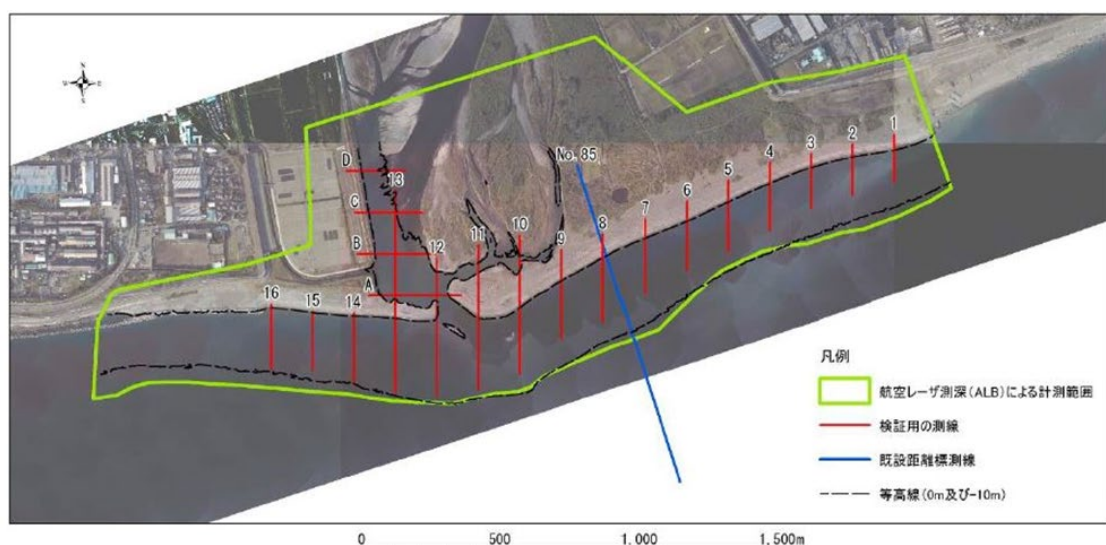


図3.2-1 富士海岸のシングルビーム測量と間接水準測量の比較用測線

表3.2-2 計測データの詳細と比較結果

比較測線数（本）	21
データ個数（個）	1196
標高の範囲（m）	+1.40-11.4
較差の平均（m）	0.06

次に点群密度を検証する．駿河海岸で実施された ALB 測量のグラウンドデータと富士海岸で実施された ALB 測量のグラウンドデータを使用する．レーザ計測における点密度とは，単位面積または単位体積あたりの計測点数のことである．今回の検証では，X 方向 20m×Y 方向 20m=400 m²の正方形を検証ブロックとし，検証ブロック内で計測された点数から 1 m²あたりの点数を算出したものを点密度として下記の式にて算出する．また，検証ブロックごとに深さ方向に関する値を定めることとし，20m×20m 検証ブロック内の点群の Z 座標の最大値と最小値の平均を測深深度として下式により算出する．

$$\text{点密度} = \frac{20\text{m} \times 20\text{m} \text{の検証ブロック内の点群データ数}}{\text{検証ブロック面積} (20\text{m} \times 20\text{m} = 400 \text{ m}^2)}$$

$$\text{測深深度} = \frac{Z_{\max} - Z_{\min}}{2}$$

$Z_{\max}$ ：検証ブロック内の点群の Z 座標の最大値

$Z_{\min}$ ：検証ブロック内の点群の Z 座標の最小値

点密度の検証を行う地点は，図 3.2-2 と図 3.2-3 に示すように，駿河海岸においてエリア A～E の 5 か所，富士海岸においてはエリア F・G の 2 か所，計 7 か所とした．検証地点 7 か所から検証ブロックを取得する過程の概念図を図 3.2-4 に示す．X 方向 20m×Y 方向 20m の検証ブロックをエリアごとに浅い方から順に範囲選択をし，小文字のアルファベットを順に振った．また範囲選択は，検証ブロックの測深値がおおよそ 1～2m ごとになるように行ない，検証ブロックごとの点密度と測深値のデータから，点密度と測深値の決定係数を算出した．

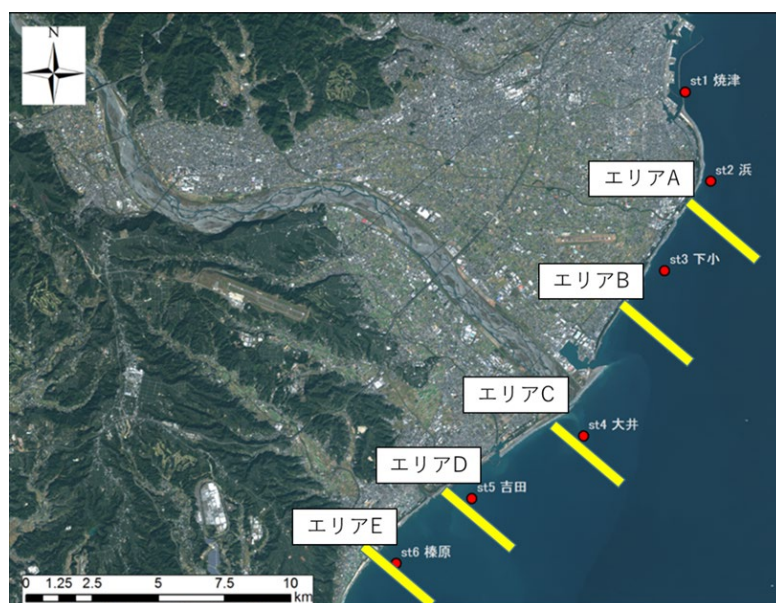


図3.2-2 駿河海岸の点密度検証エリアA～E



図 3.2-3 富士海岸の点密度検証エリア F・G

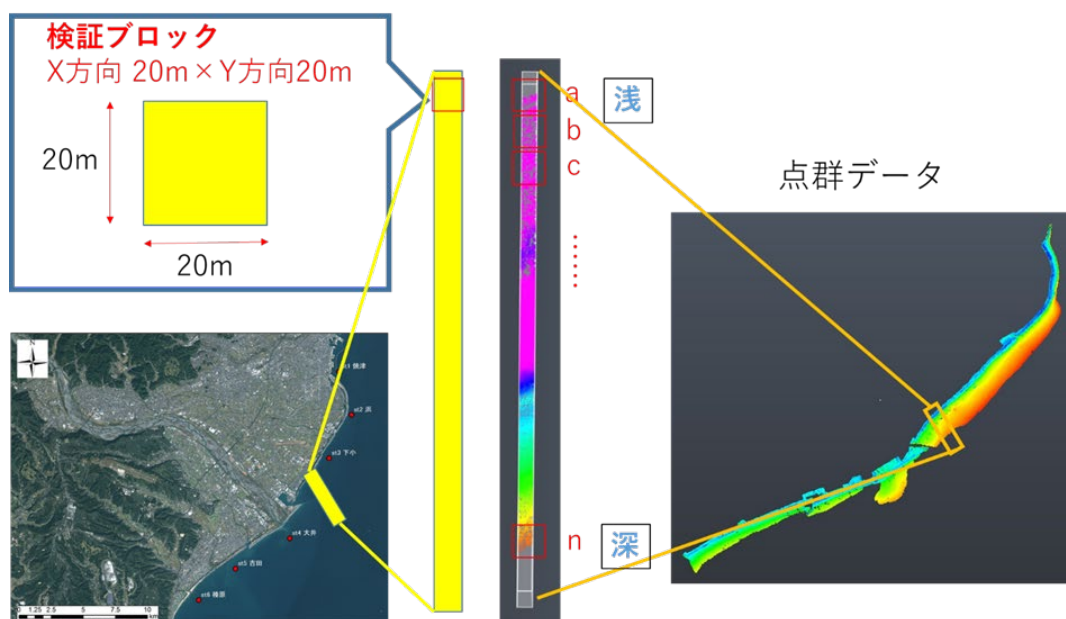


図3.2-4 点密度の算出手法の概念図

3.3 既存の手法の課題

点密度と ALB の測深深度の比較結果を表 3.3-1～表 3.3-5 に示す．まず，地上部についての点密度について述べる^{8),9)}．地上部の全エリアの点群と高度の比較結果を図 3.3-1 に示す．今回の 7 エリアでの検証では，点密度と測定高度の決定係数は 0.018 となり，相関はほとんど見られなかった．次に，水中部についての点密度を検討する．水中部の全エリアの点群と測深深度の比較結果を図 3.3-2 に示す．今回の 7 エリアでの検証では，点密度と測深深度の決定係数は 0.3184 となり，ばらつきはあるものの相関がみられた．また，水中部に関するエリアごとの測深深度との比較結果に関しては，決定係数はエリア A に関して 0.5466，エリア B に関して 0.5249，エリア C に関して 0.99，エリア D に関して 0.9962，エリア E に関して 0.5285，エリア F に関して 0.337，エリア

G に関して 0.3732 となった．特にエリア C に関しては，8 つのデータ対して決定係数 0.99 と非常

表3. 3-1 エリアAにおける点密度測深深度の比較結果

データ名	点数	z最小値(m)	z最大値(m)	z平均値(m)	点密度(点/m ²)
a	9241	2.5	3.9	3.2	22.46
b	7512	0.5	2.8	1.6	18.37
c	442	-2.8	0.3	-1.3	1.08
d	320	-4.6	-2.5	-3.5	0.80
e	578	-6.1	-5.2	-5.7	1.42
f	344	-8.0	-7.4	-7.7	0.85
g	254	-9.8	-9.4	-9.6	0.63
h	44	-13.0	-12.4	-12.7	0.12

表3. 3-2 エリアBにおける点密度測深深度の比較結果

データ名	点数	z最小値(m)	z最大値(m)	Z平均値(m)	点密度(点/m ²)
a	1522	4.4	4.9	4.6	3.66
b	9899	3.1	4.5	3.8	23.94
c	409	-3.6	-0.4	-2.0	0.97
d	517	-4.9	-3.6	-4.2	1.28
e	763	-6.5	-5.6	-6.1	1.88
f	357	-8.3	-7.8	-8.1	0.89
g	294	-10.5	-9.8	-10.2	0.74
h	202	-11.5	-10.9	-11.2	0.50
i	136	-12.4	-11.8	-12.1	0.34
j	89	-13.1	-12.6	-12.9	0.22

表3. 3-3 エリアEにおける点密度測深深度の比較結果

データ名	点数	z最小値(m)	z最大値(m)	Z平均値(m)	点密度(点/m ²)
a	3063	2.4	5.4	3.9	7.37
b	1250	0.0	0.5	0.2	3.04
c	6304	1.0	2.8	1.9	15.29
d	10943	0.2	2.6	1.4	26.39
e	529	-3.5	-1.4	-2.4	1.28
f	296	-5.0	-4.4	-4.7	0.74
g	352	-5.8	-5.1	-5.4	0.87
h	258	-6.8	-6.1	-6.4	0.65
i	231	-7.5	-6.9	-7.2	0.57
j	122	-8.5	-8.1	-8.3	0.30
k	35	-9.8	-8.8	-9.3	0.09
l	23	-10.0	-9.5	-9.7	0.07

表3.3-4 エリアFにおける点密度測深深度の比較結果

データ名	点数	z最小値(m)	z最大値(m)	z平均値(m)	点密度(点/m ²)
a	4702	9.8	10.2	10.0	11.18
b	8200	6.2	7.8	7.0	18.89
c	4903	3.4	5.5	4.4	11.43
d	12203	1.3	3.3	2.3	28.98
e	1173	-2.2	0.2	-1.0	2.76
f	741	-3.0	-2.0	-2.5	1.80
g	770	-3.8	-2.6	-3.2	1.79
h	708	-4.7	-3.6	-4.2	1.65
i	708	-5.3	-4.4	-4.8	1.71
j	1545	-7.5	-5.9	-6.7	3.81
k	903	-8.3	-7.0	-7.6	2.12
l	501	-9.1	-7.8	-8.5	1.20
m	308	-9.8	-8.7	-9.2	0.74
n	253	-10.4	-9.3	-9.8	0.60
o	109	-11.6	-10.5	-11.0	0.27

表3.3-5 エリアGにおける点密度測深深度の比較結果

データ名	点数	z最小値(m)	z最大値(m)	Z平均値(m)	点密度(点/m ²)
a	5398	1.4	2.0	1.7	12.60
b	1529	1.3	1.6	1.4	3.58
c	7295	0.6	1.4	1.0	17.24
d	1265	-0.8	-0.3	-0.6	3.03
e	691	-1.3	-0.8	-1.0	1.64
f	757	-1.7	-1.2	-1.5	1.82
g	4476	1.2	1.8	1.5	10.64
h	713	-1.5	0.1	-0.7	1.70
i	731	-2.2	-1.4	-1.8	1.72
j	1478	-3.4	-2.5	-2.9	3.52
k	888	-4.4	-3.6	-4.0	2.12
l	718	-5.4	-4.5	-4.9	1.71
m	726	-6.4	-5.5	-5.9	1.76
n	625	-7.8	-6.6	-7.2	1.49
o	394	-9.1	-7.4	-8.3	0.98
p	286	-10.2	-8.6	-9.4	0.68

に強い相関関係がみられる¹⁰⁾。したがって、これらのデータから、海底地形計測におけるALB測量について点密度と測深深度には強い相関関係があり、測深が深くなるほど点密度が小さくなることがわかる。また、点密度の値に着目すると、1㎡に1点が計測できたのは最大で8.5mの深さであった。また地上部と水中部の点密度と高度の関係をグラフ化したものが表2.4-11である。地上部の点密度の平均値は13.1点/㎡、地中部の点密度の平均値は1.23点/㎡であり、地上部と水中部では点密度に大きな違いがみられた。

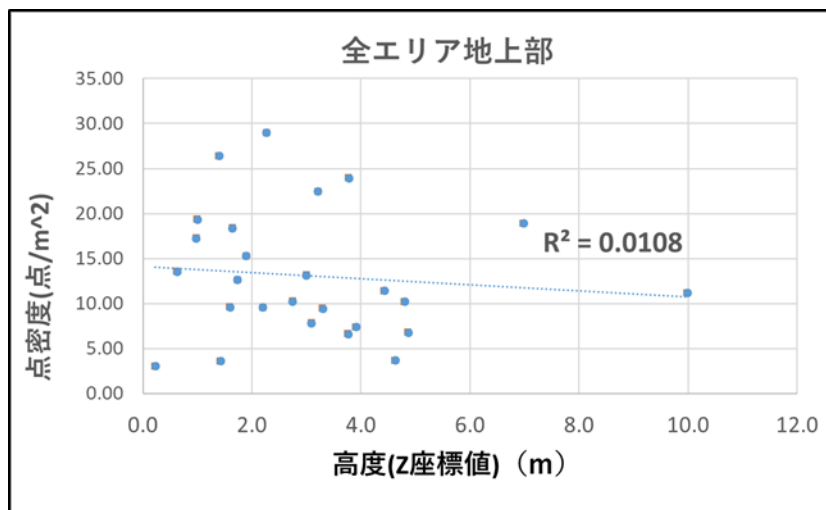


図3. 3-1 全エリアにおける地上部の点密度と測深深度の比較

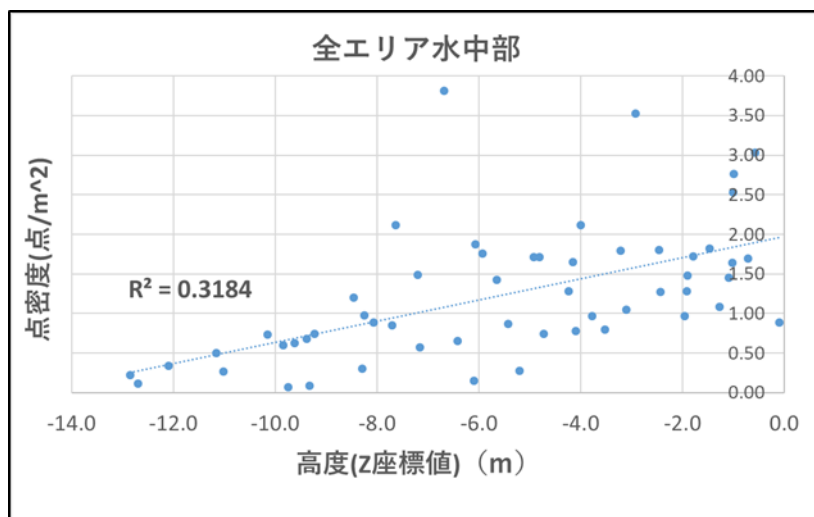


図3. 3-2 全エリアにおける①水中部の点密度と測深深度の比較

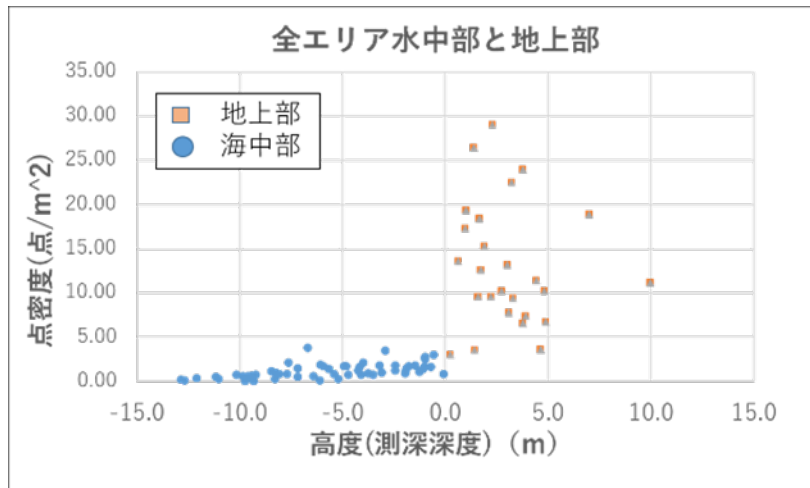


図3.2-7 全エリアにおける水中部と地上部の点密度と測深深度の比較

図3.3-3のように、ALBの点密度について、地中部の点密度平均は13.1点/㎡，水中部の点密度平均は1.23点/㎡であることが検証できた．水中部について，ALBの測深深度と点密度の決定係数は0.3184であり，1㎡に1点以上の計測が行えた最大水深は8.5mであった．これより，測深能力は高いが，点群密度が低く，詳細な地形の把握には困難が生じると考える¹¹⁾．

第4章 スマート農業実現に向けたセンシング手法

4.1 スマート農業用UAVハード仕様

使用した UAV 機材は DJI 社の Matrice 600pro, UAV 写真測量も同時に行うためにデジタルカメラは DJI-Z3 を用いた. デジタルカメラ DJI-Z3 は, センサーが CMOS, 静止画有効画素数 1240 万画素, 焦点距離は 22 mm-77 mm, F 値は 2.8-5.2 のものを使用した. レーザスキャナはアミューズワンセルフ社のグリーンレーザスキャナ TDOT GREEN を使用した. スキャン速度は 30 走査/秒, レーザ波長は $532\pm 1\text{nm}$, 測定距離は反射率 10%以上で 158m・反射率 60%以上で 300m である. 詳細なスペックは表 4.1 に示す. なお, 機体重量は TB48S バッテリーを 6 個, 本体サイズはプロペラ・フレームアーム・GPS マウントを広げた状態, ランディングギアを含む. このグリーンレーザは湿った地面や水を透過し水面下の地形を面的にとらえることが出来る. 使用した計測機材は図 1 に示す. UAV グリーンレーザ測量はレーザを地上に照射し反射した場所の距離を UAV が求め, また 3 次元座標をデータとして得る. 計測から得たデータをもとに三次元点群を作成する. 三次元点群について GNSS 観測データと IMU 観測データを用いて最適軌跡解析を行った. この最適軌跡解と計測 RAW データより, 三次元計測データ(点群データ)を得た. また本研究では, 圃場計測マニュアルに記載されている, 農地面の高低差は 5 cm 以下を目標に設定した. これ以上の高低差があると圃場の水管理を適切に行えないためである. 水の管理が圃場全体で均一に行えないと, 農作物の生育のムラや雑草の繁茂の原因となり, 最終的な米の収量に影響を及ぼすと考えられている.

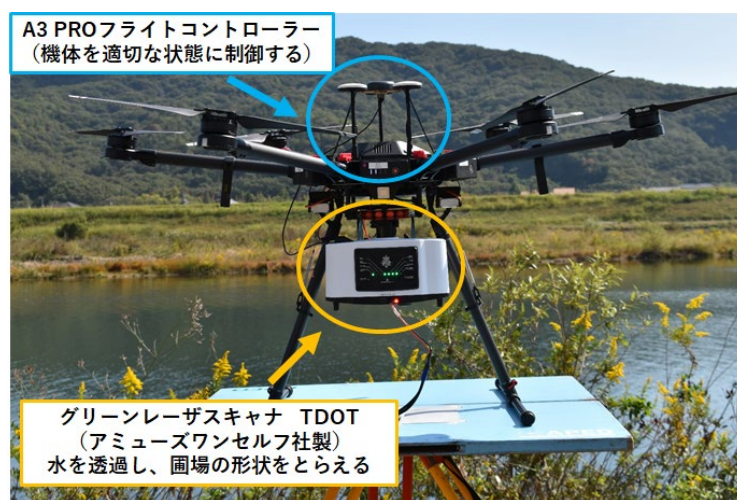


図 4.1-1 計測で用いた計測機器

表 4.1-1 : Matrice600pro のスペック

機体重量	10kg
本体サイズ	1668mm×1518mm×727mm
最長フライト 可能時間	22分
最大風圧抵抗	8m/s
最大速度	40km/h
動作環境温度	-10～40℃

UAV 測量は大きく 2 種類に分かれており、写真測量とレーザ測量である。写真測量は、上空から UAV 機器に搭載したカメラが地上の写真を重ね合わせて取り、その写真を繋ぎ合わせることで対象地域の地形のデータを得ることが出来る。写真測量は比較的安価で行える点にメリットがあるが、標定点を置かなければならない、また写真であることから草木などの植生があるところや水面下の地形を把握すること出来ない点がデメリットである。反して、レーザ測量は、上空から対象地域に向けてレーザを照射し、照射したレーザが地面から反射した距離をレーザスキャナが計算することにより対象地域のデータを得るものである。写真測量と比較してコストは上がってしまうことや重量の大きいスキャナを乗せるため飛行時間が制限されるなどのデメリットもあるが、写真測量では補えなかった部分のより精密なデータを得ることが出来る点に最大のメリットがある。これまでレーザ測量においては水域の河川や湾岸での地形計測を苦手としてきたが、最近ではグリーンレーザと呼ばれる、緑色の波長を用いたレーザスキャナの開発が進んでいる。グリーンレーザ UAV 測量の先行研究として、河川構造物の点検にむけた陸部から水部を含む地形や対象物へ計測手法として研究が進められている。河川においてこれまで、河川での計測では水質や底質といった水部の状況により測深能力が異なるとされているため、定量的な計測特性を把握することが困難であり、そのため水部の位置精度等の検証が十分でなかったことを提議したうえで、グリーンレーザスキャナの位置精度検証と河川構造物への点検手法として適用検討を行っている。河川を対象にした計測において、UAV グリーンレーザ計測が陸部で 5 cm 以下、水部で 10 cm 以下の位置精度で地形形状を把握することを示し、さらに、段彩図を用いることで河川構造物の形状の見える化を用いることで面的に定量的に記録することが出来るとされる。グリーンレーザは、緑色のレーザを地上に照射し、水面で反射するパルスの往復時間と、水を透過し推定で反射するパルスの往復時間差から水深を計算し、陸部と水部の両方の地形を 3 次元的に計測する。緑色のレーザは、これまでレーザ測量で用いられてきた近赤外等の波長より長い 500 nm 程度のものを使用している。そのため、グリーンレーザは水面で吸収されることなく、透過するため、水面下の地形を計測することが出来る。また、本研究で用いた TDOTGREEN は、人体への障害を回避のため、アイセーフ機能も備えている。特に、緑色の波長のレーザは目に当たると網膜を傷つけてしまうことがあるためである。地上から水面下までシームレスな計測が可能であるため、河川や港湾などの水部の計測が必要である対象地域での計測方法として期待されている。^{1) 2) 3)}

表 4.1-2 : TDOT GREEN のスペック

本体重量	1.8kg
本体サイズ	縦186×横260×高さ150
レーザ波長	532±1nm
水平精度	±10mm
高さ精度	±20mm

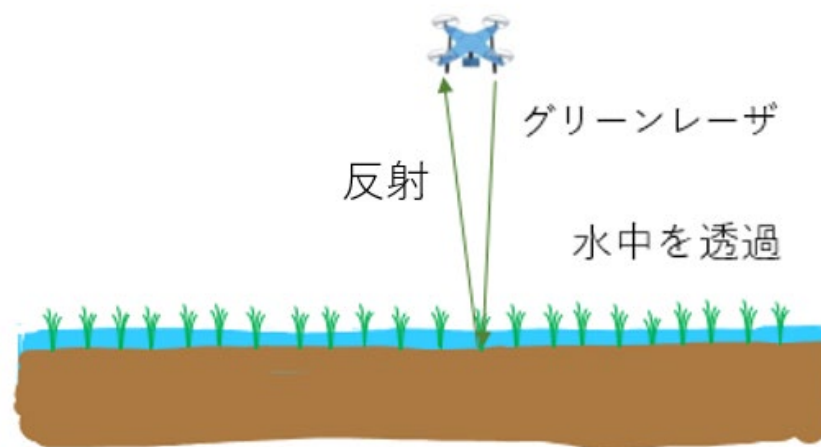


図 3.1-2：グリーンレーザが水面下の地形を取得するシステム

4.2 計測現場・時期

計測現場について、岡山県真庭市鹿田にある約 76000 m²の圃場で計測を行った。計測現場とグリーンレーザ計測で用いた現場を図 4.2-1 に示す。この圃場は岡山県の北部・真庭市鹿田の中山間地域に位置しており、大規模な圃場の管理やデータ化を目的としたスマート農業に関する業務が行われている。特に水面下形状の検証で行った圃場の位置を A・B として示す。この圃場（A・B）では、湛水直播栽培が行われている。

また、本研究ではグリーンレーザスキャナ本体の計測精度を検証も同時に行うため、地上測量で用いた検証点・調整点を図 4.2-2 に示す。比較用として圃場内に標定点を設置し、検証点の座標の値をデータとして取得した。設置した対空標識の例を図 3-9 に示す。調整点は、三次元点群の精度の低下を避けるため、計測対象範囲の形状、比高が大きく変化するような箇所、地表面の粒度を考慮して配置した。また検証点は、標定点とは別に計測データを点検するために設置した。^{4) 5) 6)}

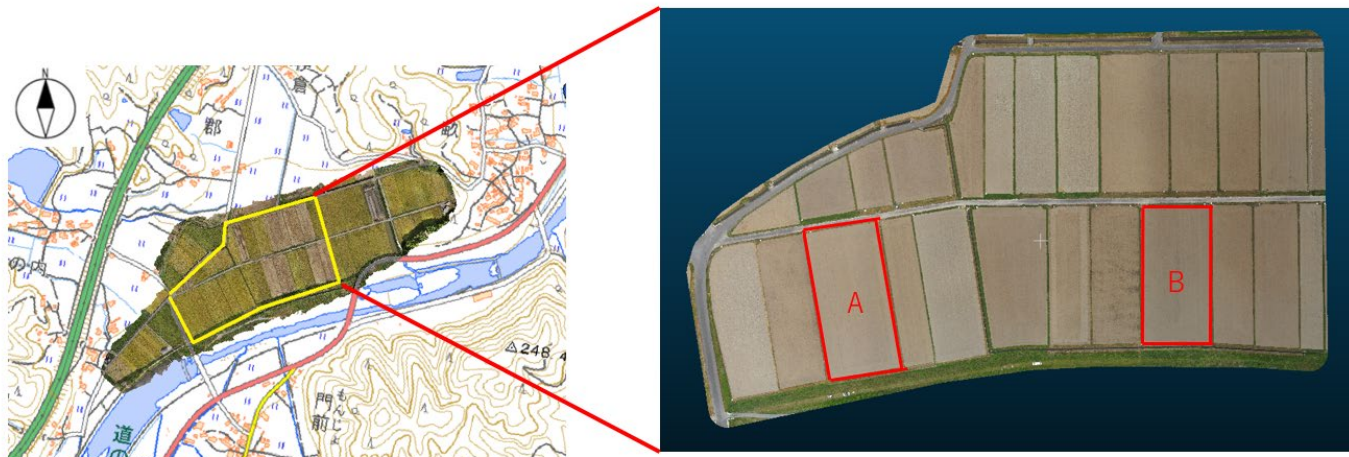


図 4.2-1 計測対象の圃場

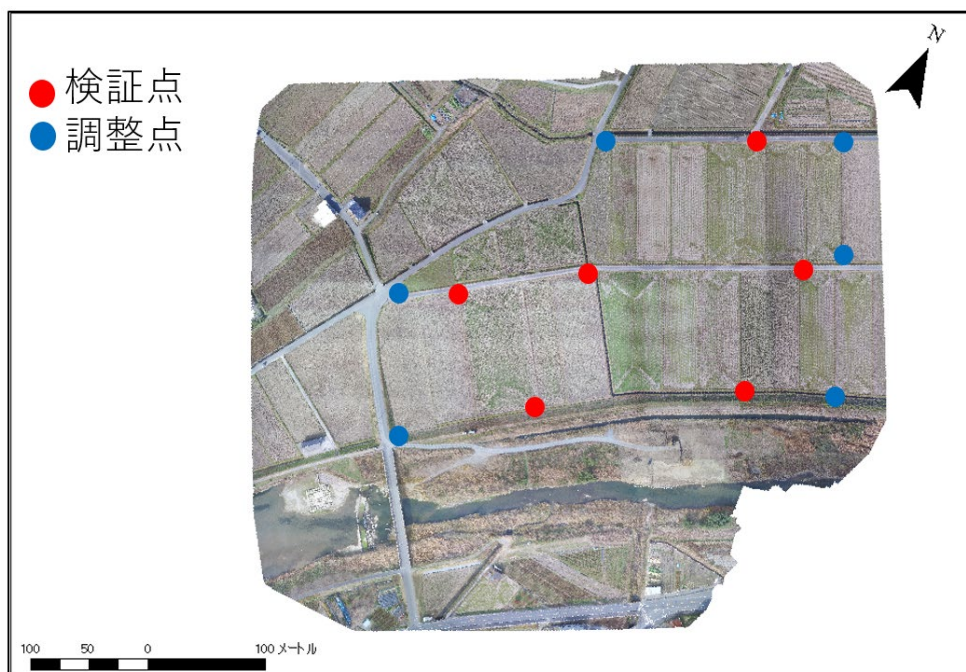


図 4.2-2 基準点・検証点・調整点の位置



図 4.2-3 設置した対空標識の例

計測時期・計測条件の概要を表 4.2-3, 4.2-4 に示す。計測は、2020 年 5/15(一度目のレーザラベラーでの均平化後・水無), 5/28(代掻き後・全面に 10~15 cm 程度の水有), 7/2(直播出芽後・一部に水有, 全面に 10 cm 程度の稲有), 10/26(稲刈り後, 水無) の 4 時期行った。計測条件はいずれの 4 時期とも, 対地高度 50m, 対地速度 2.5m/s, コース間重複度 75% 標準, 点密度 100 点/㎡以上での高密度で実施した⁷⁾⁸⁾。



図 4.2-4 5 月 28 日の水を張った圃場（左）と圃場の一部が露呈している画像（右）

表 4.2-3：計測日程と圃場の状況

1	2020/5/15	水無	均平化後
2	2020/5/28	全面に 10~15cm の水有	代掻き後
3	2020/7/2	一部に水有、 全面に 10cm 程度の稲有	直播の出芽後
4	2020/10/26	水無	稲刈り後

表 3.2-4：全日程共通計測条件

対地高度	50m
対地速度	2.5m/s
コース間ラップ率	75% 標準
点密度	100 点/㎡以上

4.3 計測データの解析手法

グリーンレーザの観測データから、三次元点群データおよびオリジナルデータの作成は、主に①最適軌跡解析、②点群生成、③屈折補正の工程で行われた。最適軌跡解析は GNSS 観測データと IMU 観測データを用い、電子基準点は固定局から現場から約 1 km 離れた電子基準点・落合を使用した。電子基準点を用いることで、自己位置を計測し、IMU のデータとともに姿勢情報の解析を行う。点群生成では、最適軌跡解析の結果とグリーンレーザスキャナで取得したデータを総合解析し三次元点群のデータの作成をする¹²⁾¹³⁾。UAV での写真測量のデータから、点群データには簡易オルソ画像 RGB 情報と反射強度の情報を付与した。5 月 15 日は水入れ前のため、水部補正は行っていない。5 月 28 日は入水後で 10~15 cm 程度の水深があることより水部において屈折補正を施されたデータを扱った。7 月 2 日は、10~15 cm 程度の水深が一部ある状態であり、オルソ画像や断面図から水面を判読し、屈折補正を施されたデータを扱った。10 月 26 日は水部がないため、水部補正は行わなかった⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾。これら、処理が施されたデータを、GIS ソフトウェアである QGIS と点群のデータの解析を行える Cloud Compare で解析と後処理を行い、画像の作成とする。図 3-10~図 3-13 にクラウドコンペアでの再現例とその三次元化された断面図を示す。また、圃場の標高段彩図は 10 cm メッシュに区切り標高の凹凸を表現している。

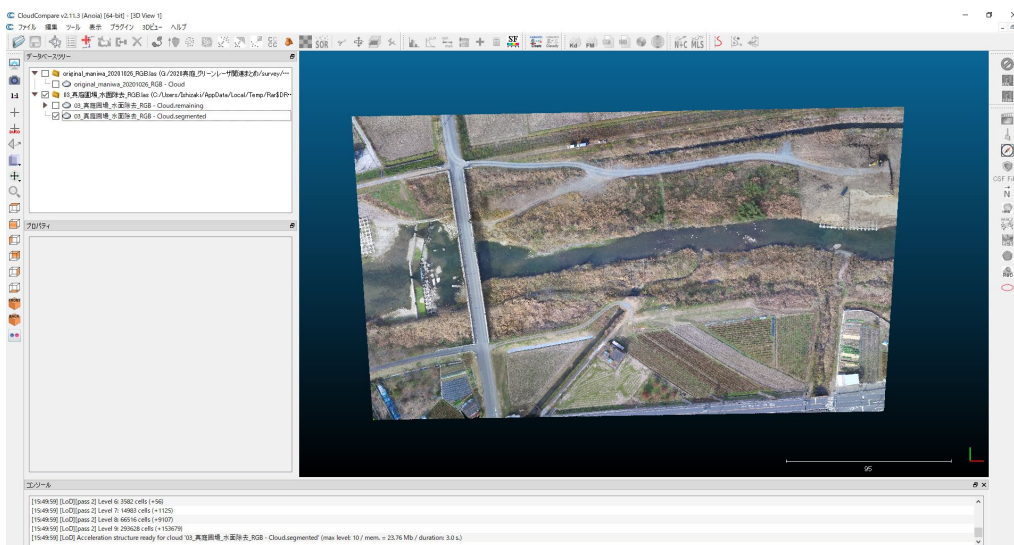


図 4.3-1 クラウドコンペアでの三次元点群の処理の再現例



図 4.3-2 クラウドコンペアでの三次元再現と断面図の位置



図 4.3-3 断面図の三次元再現例①



図 4.3-4 断面図の三次元再現例②

4.4 精度検証結果

前述の通り、調整点はグリーンレーザスキャナで得られたオリジナルデータの三次元点群の精度の低下を避けるために設置する。調整点を用いた検証で、オリジナルデータが要求精度を満たさない場合、満たさない要素に対して補正量としてシフト調整を行うことで、その後の検証点での点検で要求精度の点検を行う。調整点では調整点付近で取得した点を標高方向にどの程度ばらつきがあるのかについて要求精度を満たしているかに着目する¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾。

表 4.4-1～4.4-8 に、地上測量で得られた調整点の各成分のデータとグリーンレーザスキャナで得られたデータとの検証結果を示す。表 4.4-1, 4.4-3, 4.4-5, 4.4-7 は各時期における調整点とオリジナルデータとの均一度を示す。調整点を用いた検証の要求精度は±5 cm以内とする。直播栽培では、特に圃場の均平化がその後の出芽や苗立ちに影響しやすく、この数値に設定するのは圃場の水管理が適切に行えるようにするためである。いずれの時期も、較差及び最大値、標準偏差の均一度は要求精度を満たすことがわかった。そのうえで、位置正確度である表 5-2, 5-4, 5-6, 5-8 を示す。各調整点とオリジナルデータで得られたデータを平均及び標準偏差をとって位置正確度がどの程度であるか検証した。今回の計測では位置正確度についても要求精度を満たしている。特に、5月15日、28日、7月2日は精度が±3 cm以内と地上位置精度のグリーンレーザの精度は良好な精度結果となった。この結果から、UAV グリーンレーザ測量では、調整点がなくとも高精度な計測が行えることが分かり、調整点の設置の時間や労働力の省力化が可能である。

表 4.4-1 5月15日 調整点とオリジナルデータの標高を用いた均一度

調整点名	1	2	3	4	5	6
較差	0.025m	0.024m	0.028m	-0.020m	-0.029m	-0.027m
最大値	0.046m	0.039m	0.047m	-0.039m	-0.048m	-0.048m
標準偏差	0.026m	0.025m	0.030m	0.022m	0.031m	0.029m

表 4.4-2 5月15日 調整点とオリジナルデータを用いた位置正確度

	X	Y	XY	Z
平均値	0.000m	0.000m	0.016m	0.000m
標準偏差	0.011m	0.017m	0.020m	0.029m
最大値	-0.019m	0.029m	0.029m	0.028m

表 4.4-3 5月28日 調整点とオリジナルデータの標高を用いた均一度

点名	1	2	3	4	5	6
平均値	0.018m	0.013m	0.005m	-0.027m	-0.009m	-0.002m
最大値	0.041m	0.043m	0.032m	-0.049m	-0.032m	-0.026m
標準偏差	0.021m	0.017m	0.015m	0.030m	0.013m	0.011m

表 4.4-4 5月28日 調整点とオリジナルデータを用いた位置正確度

	X	Y	XY	Z
平均値	0.000m	0.000m	0.008m	0.000m
標準偏差	0.008m	0.006m	0.010m	0.016m
最大値	0.011m	0.009m	0.014m	-0.027m

表 4.4-5 7月2日 調整点とオリジナルデータの標高を用いた均一度

点名	1	2	3	4	5	6
平均値	0.015m	0.021m	0.014m	-0.017m	-0.020m	-0.016m
最大値	0.048m	0.039m	0.040m	-0.036m	-0.037m	-0.034m
標準偏差	0.020m	0.022m	0.019m	0.020m	0.023m	0.020m

表 4.4-6 7月2日 調整点とオリジナルデータを用いた位置正確度

	X	Y	XY	Z
平均値	0.000m	0.000m	0.019m	-0.001m
標準偏差	0.020m	0.012m	0.022m	0.019m
最大値	0.029m	0.014m	0.032m	0.021m

表 4.4-7 10月26日 調整点とオリジナルデータの標高を用いた均一度

点名	1	2	3	4	5	6
平均値	0.020m	0.019m	0.027m	-0.031m	-0.019m	-0.018m
最大値	0.046m	0.039m	0.047m	-0.047m	-0.045m	-0.034m
標準偏差	0.022m	0.022m	0.028m	0.032m	0.022m	0.021m

表 4.4-8 10月26日 調整点とオリジナルデータを用いた位置正確度

	X	Y	XY	Z
平均値	0.000m	0.000m	0.029m	0.000m
標準偏差	0.021m	0.025m	0.033m	0.025m
最大値	0.031m	0.027m	0.035m	-0.031m

次に地上測量によって得られた検証点の座標値を用いて、検証点とグリーンレーザのオリジナルデータの点検を行った。各時期において、いずれにおいても各成分で要求精度 ± 5 cmを満たし、特に5月15日、28日、7月2日は ± 3 cm以内の精度を得ることが出来た。グリーンレーザの地上位置精度は良好な結果を得た。いずれの点検においても、要求精度は満たしているが、精度をより向上させるために、5月15日のデータを基準として、圃場の可視化評価で用いるAとBの標高値をシフト調整した。5月28日はAを $+2.1$ cm、Bを $+4.3$ cm、7月2日はAを $+0.7$ cm、Bを $+1.7$ cm、標高をシフト調整したものを5.3での圃場不陸観測で使用するものとする¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾。

表 4.5-1 5月15日 検証点とオリジナルデータを用いた点検

	X	Y	Z
平均値	-0.003m	-0.013m	0.003m
標準偏差	0.016m	0.019m	0.026m
最大値	0.022m	-0.028m	0.028m

表 4.5-2 5月28日 検証点とオリジナルデータを用いた点検

	X	Y	Z
平均値	0.002m	0.008m	-0.010m
標準偏差	0.017m	0.012m	0.025m
最大値	-0.028m	0.019m	-0.030m

表 4.5-3 7月2日 検証点とオリジナルデータを用いた点検

	X	Y	Z
平均値	-0.008m	0.003m	0.002m
標準偏差	0.020m	0.009m	0.022m
最大値	-0.030m	0.016m	0.023m

表 4.5-4 10月26日 検証点とオリジナルデータを用いた点検

	X	Y	Z
平均値	0.012m	0.010m	-0.010m
標準偏差	0.029m	0.032m	0.023m
最大値	0.040m	0.047m	-0.035m

4.6 各時期計測結果

次に UAV グリーンレーザ測量によって得られたデータを用いて、各時期の計測結果について述べる。まず、図 3.6-1 に 5 月 28 日（全面に 10～15 cm 程度の水部有）のオルソ画像を示す。上空からのオルソ画像で見ても分かるように、一部水面が反射して見える部分（赤枠で囲んだ場所）があり、水部を確認できる。4 時期を通したオルソ画像を図 4.6-2 と図 4.6-3 に示す。7 月 2 日は全体的に稲が成長しているため、上空からでも植生が把握でき、10 月 26 日では、稲刈り後であるために圃場に凸凹がある部分が判断できる²⁰⁾²¹⁾。

全体圃場から、より詳細な標高の違いを評価するために、圃場 A・B として圃場一部分を抽出する。圃場 A の標高段彩図を図 4.6-4 から図 4.6-13 に示す。圃場 A において均平化作業前の 5 月 15 日は圃場全体に 5 cm 程度の高低差が全域にあるのが確認できる。均平化作業後の 5 月 28 日の計測では 5 月 15 日に比べて、全面で均平化が進んでいるが、四隅に 5 cm 程度の標高差が確認できる。また 5 月 28 日では圃場全体に 10～15 cm 程度の水深がある状態だったが、グリーンレーザによって水面下の凹凸の状態を計測が出来ている。標高の平均値は 5 月 15 日から 5 月 28 日ではほぼ変化はないが、代掻き後なので凹凸は減っている。全面に 10 cm 程度の稲と一部に 10～15 cm 程度の水深のある 7 月 2 日でも、全域で圃場の高低差が判断できている。5 月 28 から 7 月 2 日までに於いて、約 2 cm 程度沈下していた。7 月 2 日ではオルソ画像や断面図より水面を判読し、フィルタリングすることで水面下の三次元点群データを取得している。図 5 の 7 月 2 日の結果では圃場内に 10cm 以上の凸部が確認された。これらは出芽後の稲であることがデータの断面形状から確認された。10 月 26 日では稲刈り後に計測しているため、圃場全体に凹凸が多く広範囲に表れている。また、全域で 10 cm の高低差があり、一部 10 cm 程度の凹みを確認できる。

圃場 B の標高段彩図を図 5-10 から図 5-13 に示す。圃場 B において均平化作業前の 5 月 15 日は圃場全体に 5 cm 程度の高低差が全域にあるのが確認できる。また中央に 10 cm 程度の著しい凹みがある。均平化作業後の 5 月 28 日の計測では 5 月 15 日に比べて、中央の凹みが低減されている。また 5 月 28 日では圃場全体に 10～15 cm 程度の水深がある状態だったが、グリーンレーザによって水面下の凹凸の状態を計測が出来ている。標高の平均値は 5 月 15 日より 0.6 cm 増加し、また代掻き後なので凹凸は減っている。全面に 10 cm 程度の稲と一部に 10～15 cm 程度の水深のある 3 時期目でも、全域で圃場の高低差が判断でき、中央には機械が通った筋も画像から判断できる。7 月 2 日ではオルソ画像や断面図より水面を判読し、フィルタリングすることで水面下の三次元点群データを取得している。図 5 の 7 月 2 日の結果では圃場内に 10cm 以上の凸部が確認された。これらは出芽後の稲であることがデータの断面形状から確認された。圃場 A と同様に 10 月 26 日では稲刈り後に計測しているため、圃場全体に凹凸が多く広範囲に表れている。また、全域で 5 cm の高低差があり、中央に -10 cm 程度の凹みを確認できる。特に、田植え以前にもあった中央の凹みの程度が大きくなっている。4 時期を通して、圃場の不陸の傾向はあまり変わっておらず、また中央の凹みは改善出来ていない²²⁾²³⁾。

圃場 A・B 両時期を通して、四隅に -10 cm 以上の凹みが確認出来る。これは、排水によるものであると考えられる。これまで行われてきた圃場不陸計測のための写真測量では、稲があると地面の不陸を計測できなかったが、グリーンレーザにより稲も含めて 3 次元点群にすることが出来た²⁴⁾²⁵⁾。



図 4.6-1 5月28日計測の圃場全体図

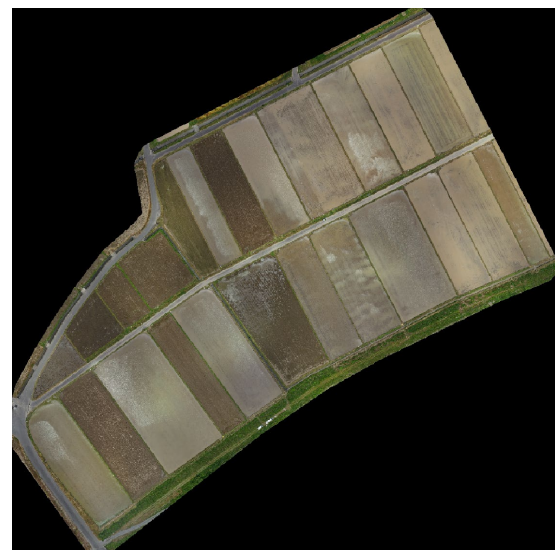


図 4.6-2 5月15日（左）と5月28日（右）のオルソ画像

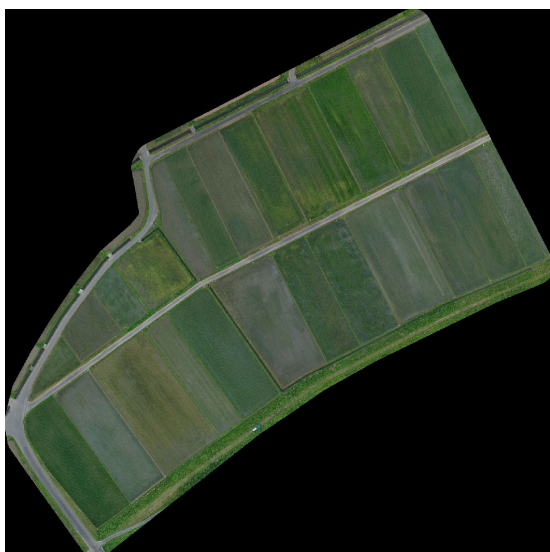


図 4.6-3 7月2日（左）と10月26日（右）のオルソ画像

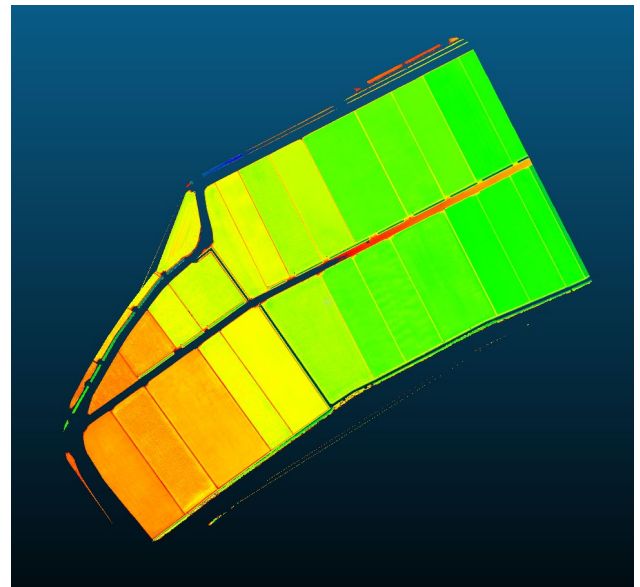
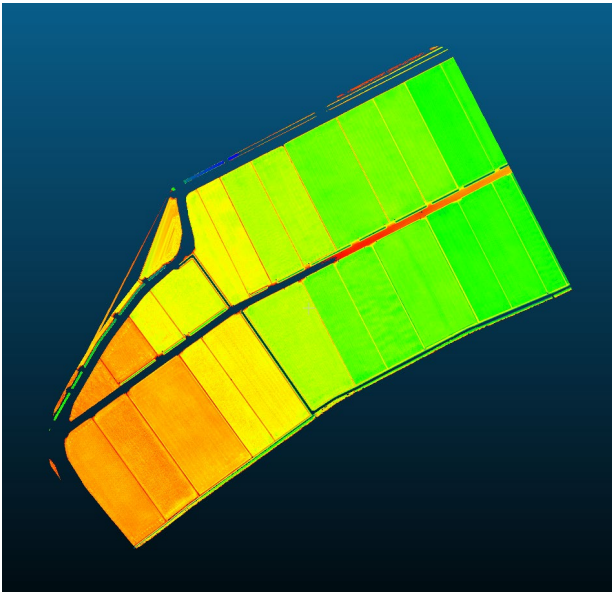


図 4.6-4 5月15日（左）と5月28日（右）の標高段彩図

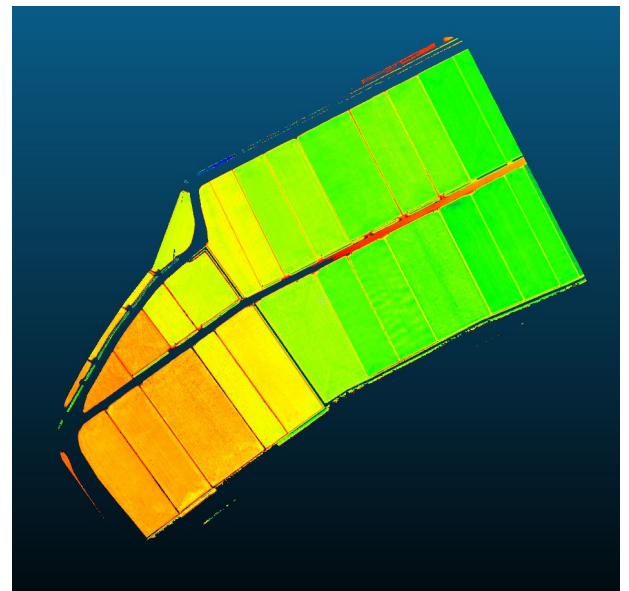
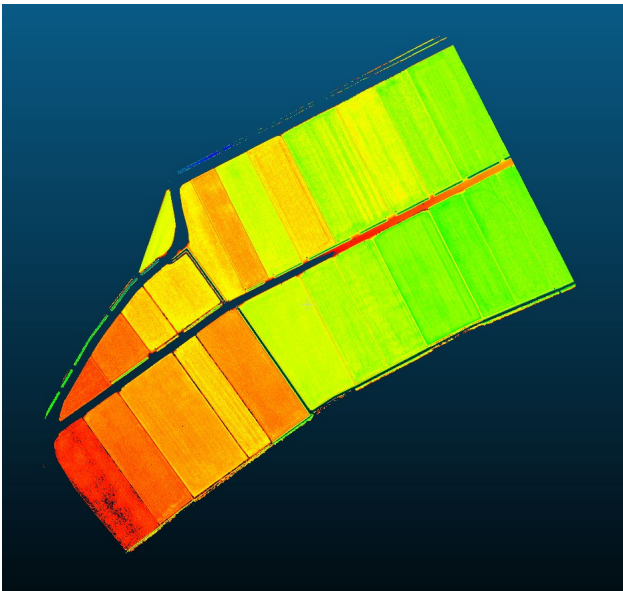


図 4.6-5 7月2日（左）と10月26日（右）の標高段彩図

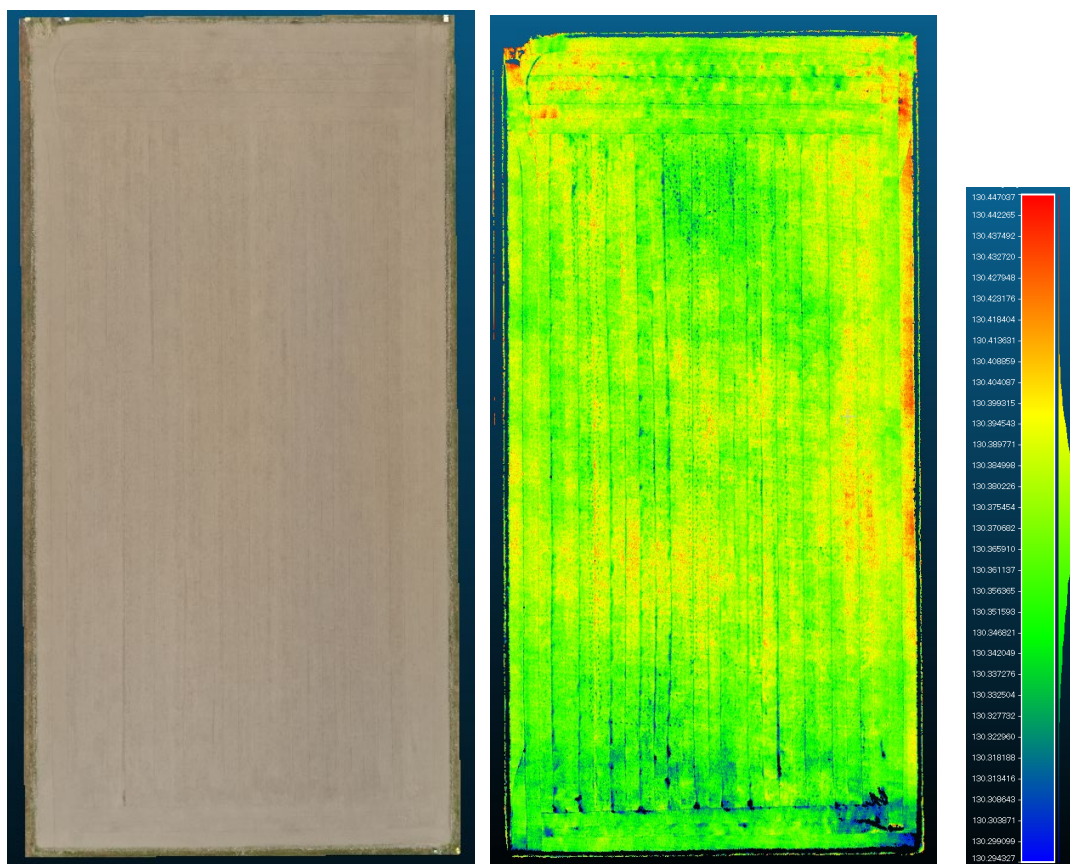


図 4.6-6 5 月 15 日 A 圃場のオルソ画像（左）と標高段彩図（右）

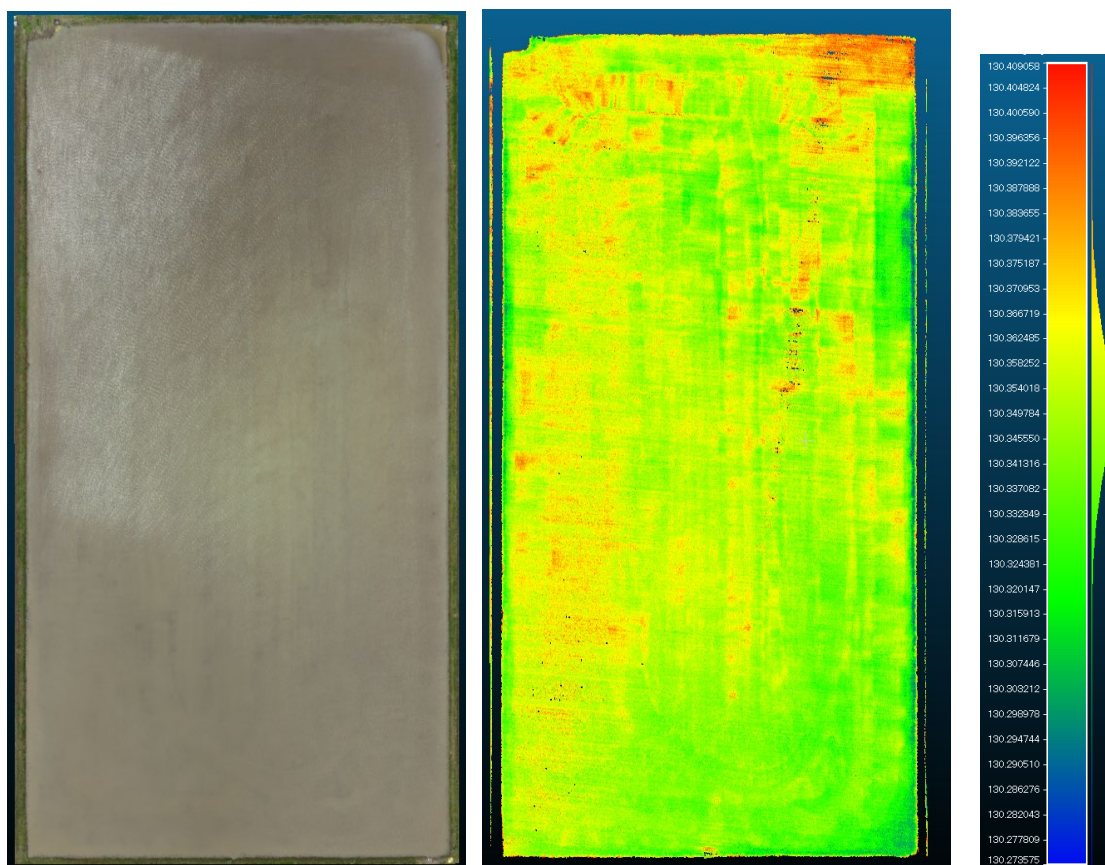


図 4.6-7 5 月 28 日 A 圃場のオルソ画像（左）と標高段彩図（右）

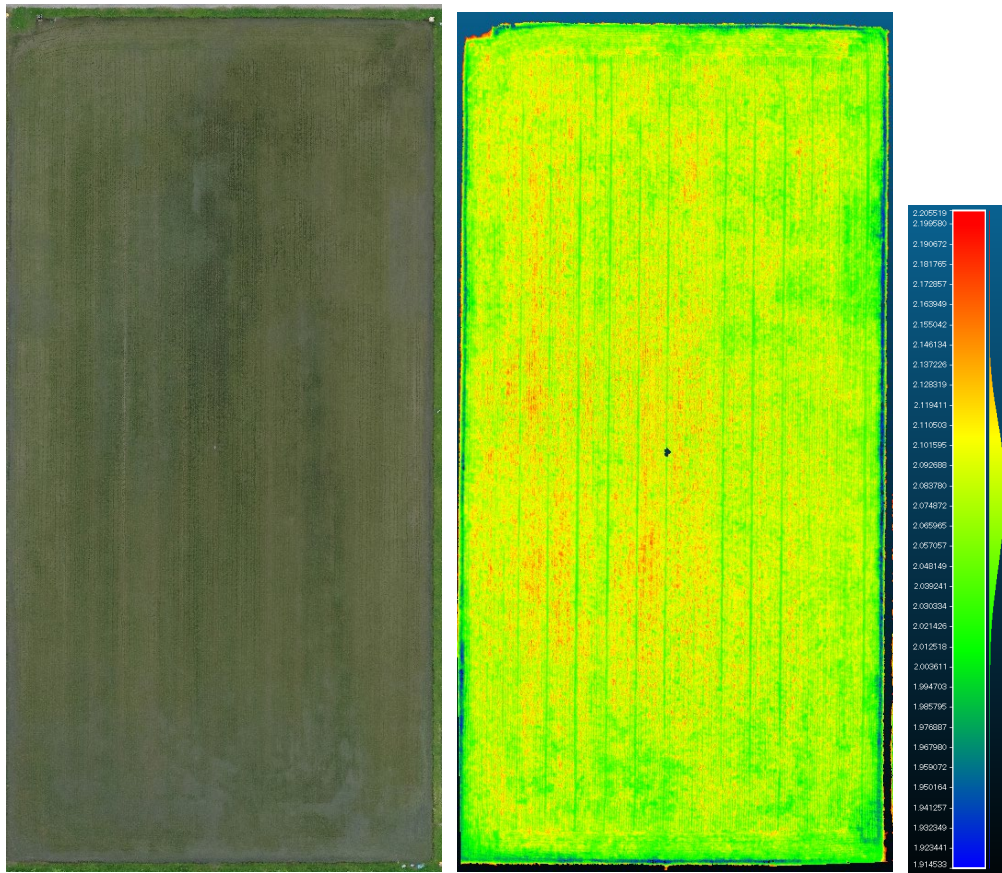


図 4.6-8 7月2日 A圃場のオルソ画像（左）と標高段彩図（右）

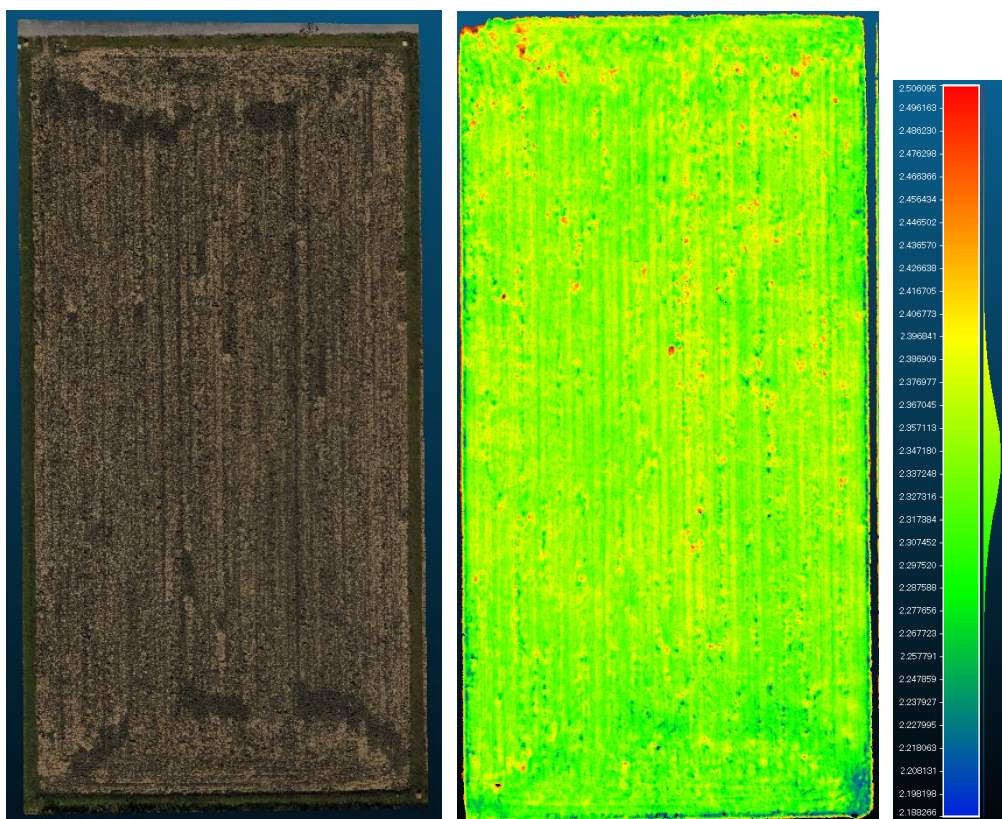


図 4.6-9 10月26日 A圃場のオルソ画像（左）と標高段彩図（右）

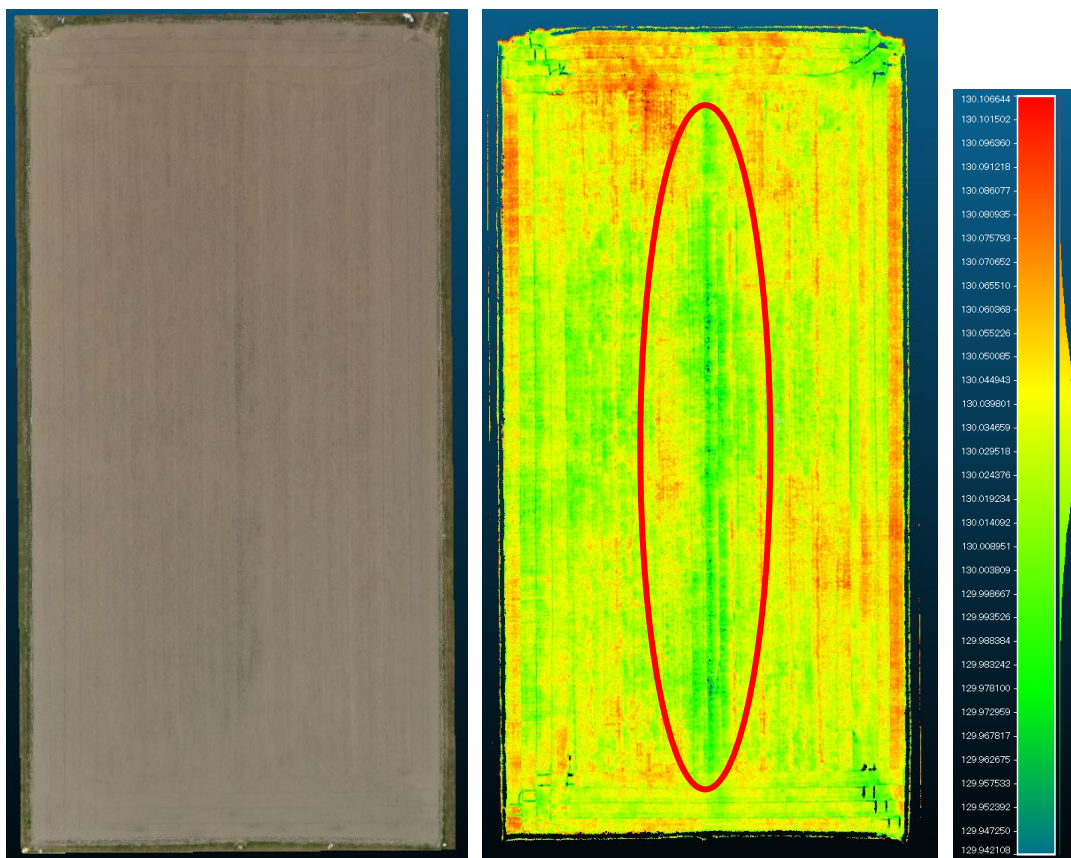


図 4.6-10 5 月 15 日 B 圃場のオルソ画像（左）と標高段彩図（右）

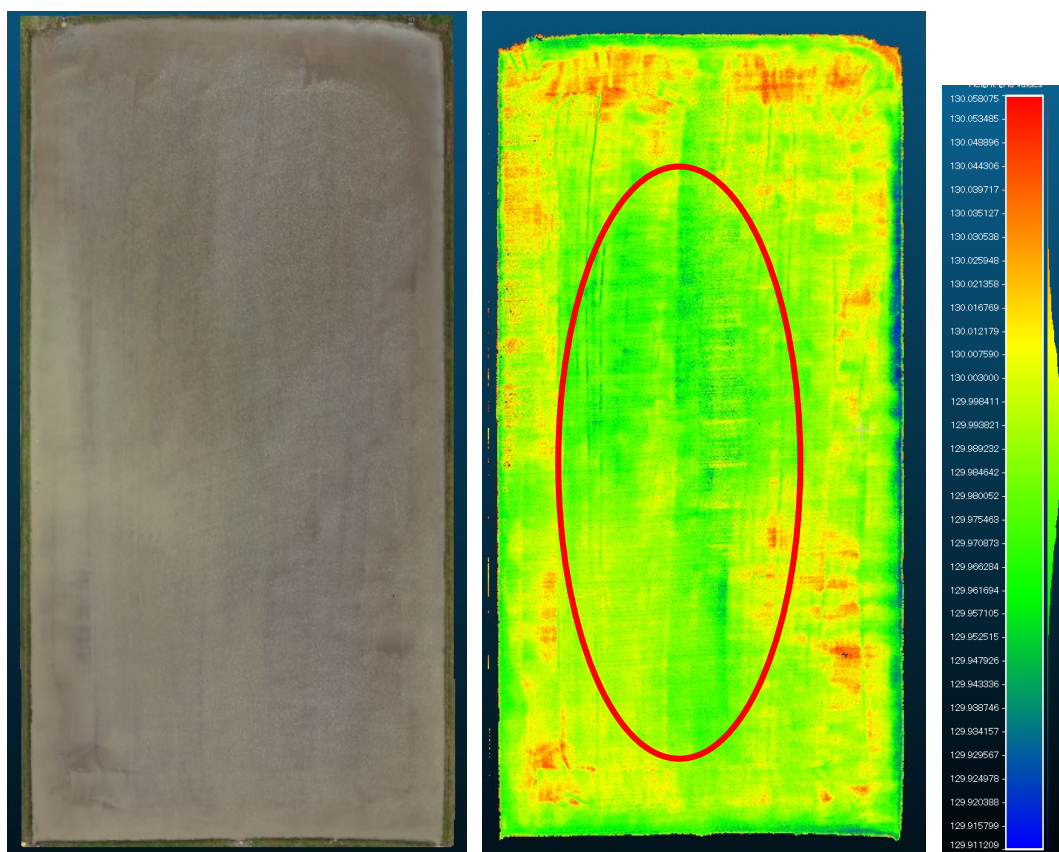


図 4.6-11 5 月 28 日 B 圃場のオルソ画像（左）と標高段彩図（右）

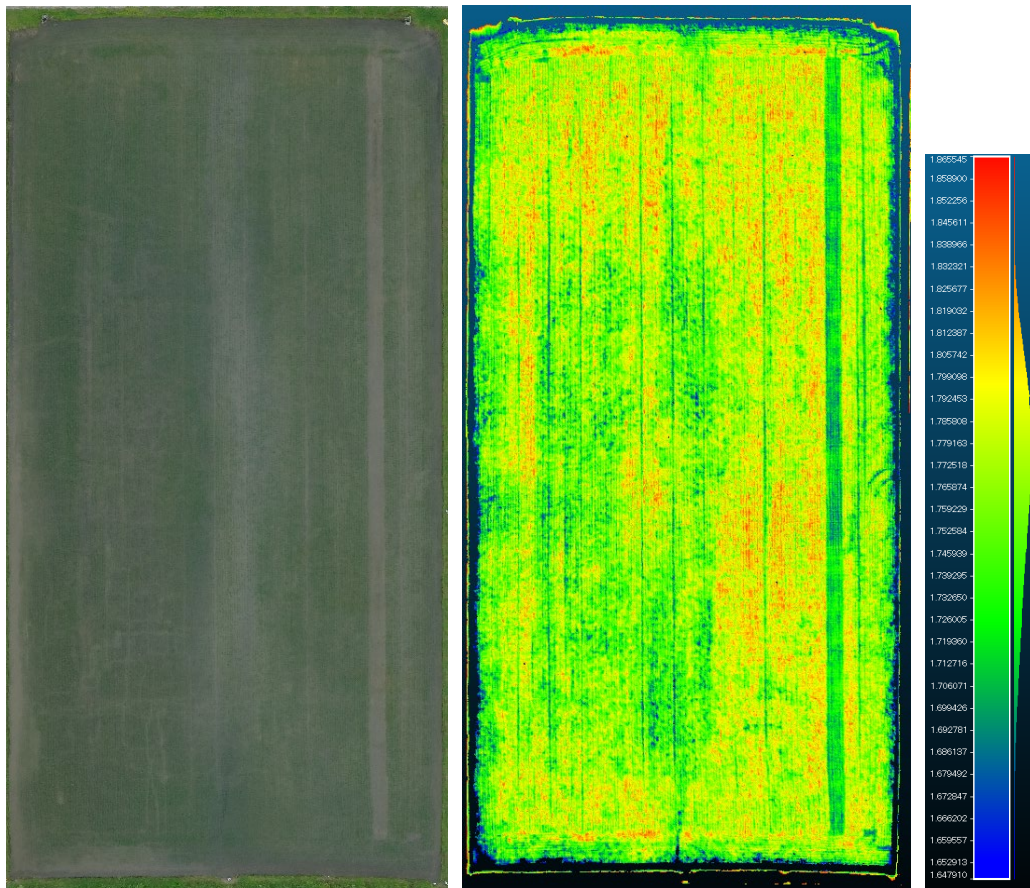


図 4.6-12 7月2日 B 圃場のオルソ画像（左）と標高段彩図（右）

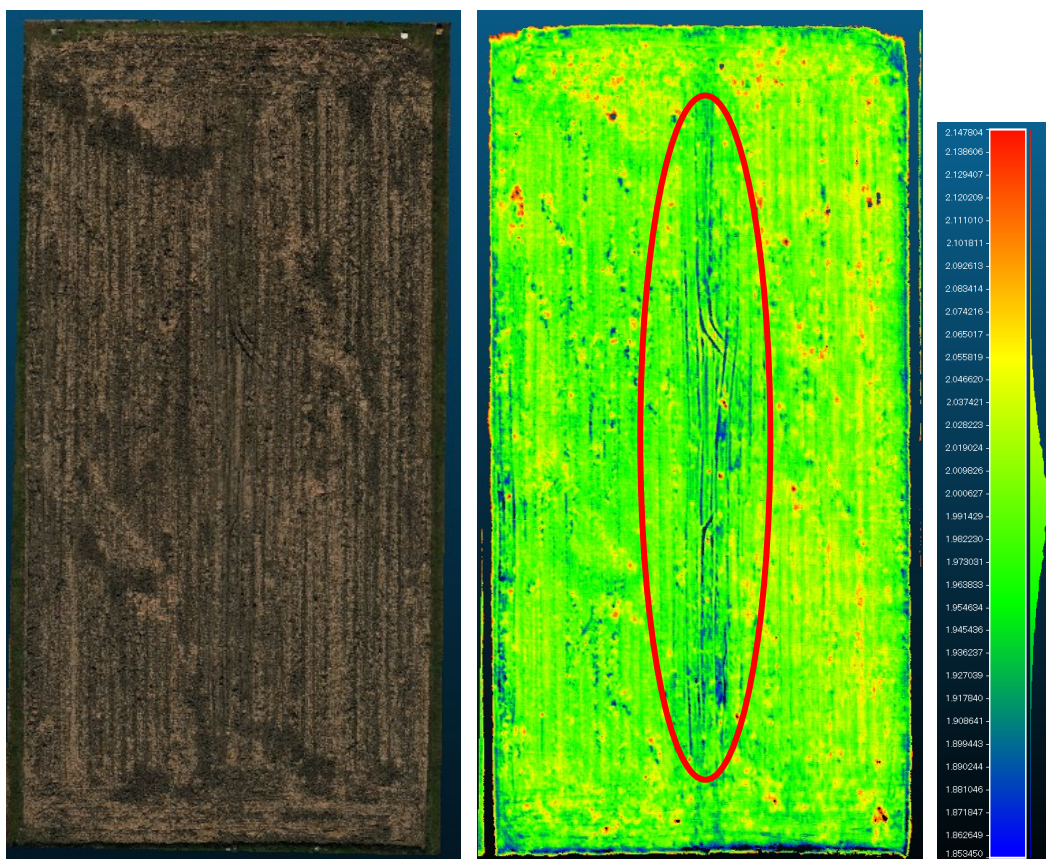


図 4.6-13 10月2日 B 圃場のオルソ画像（左）と標高段彩図（右）

4.7 圃場の均平化の評価

圃場全体の傾向が把握できたところで、次に圃場の不陸が大きいところがどのように変化しているか評価するために、一部を切り取り拡大し計測の前後で比較を行った。ここで用いた画像は、3次元点群化されたものを、10 cm間隔で区切りメッシュ化したものである。比較した部分は全計測で同じ場所を用いる。A圃場での5月15日と5月18日との比較を図4.7-1に示す。5月15日で5 cm程度の凸みが顕著に表れている部分を赤枠で示す。5月28日では5月15日の赤枠で示した部分の凸みは軽減できているが、5月28日の赤枠で示す部分があるように、むしろ均平化作業により、均一になっておらず鳴らされていた場所が隆起してしまっている箇所も見られた。5月28日と7月2日の比較図を図5-15に示す。この計測の前後で稲の苗立ちが進んでいるため、7月2日の図では全面に尖っている箇所が点在する、これは全面に約10 cm程度の稲があるためである。段彩図を拡大することで、稲がどのように配列されているかまた、稲自体の高さの違いを見て把握することが出来る。10月26日日の計測においては、前回よりおよそ4か月後に計測されており、稲刈り終了後の不陸がどのように変化しているかを把握するために計測を行った。特に赤枠で示す部分がへこんでおり、全面的に稲刈りが行われた跡が確認できた。そのあとも、稲の配列とほぼ同じ線形をたどっていることが分かる²⁶⁾。

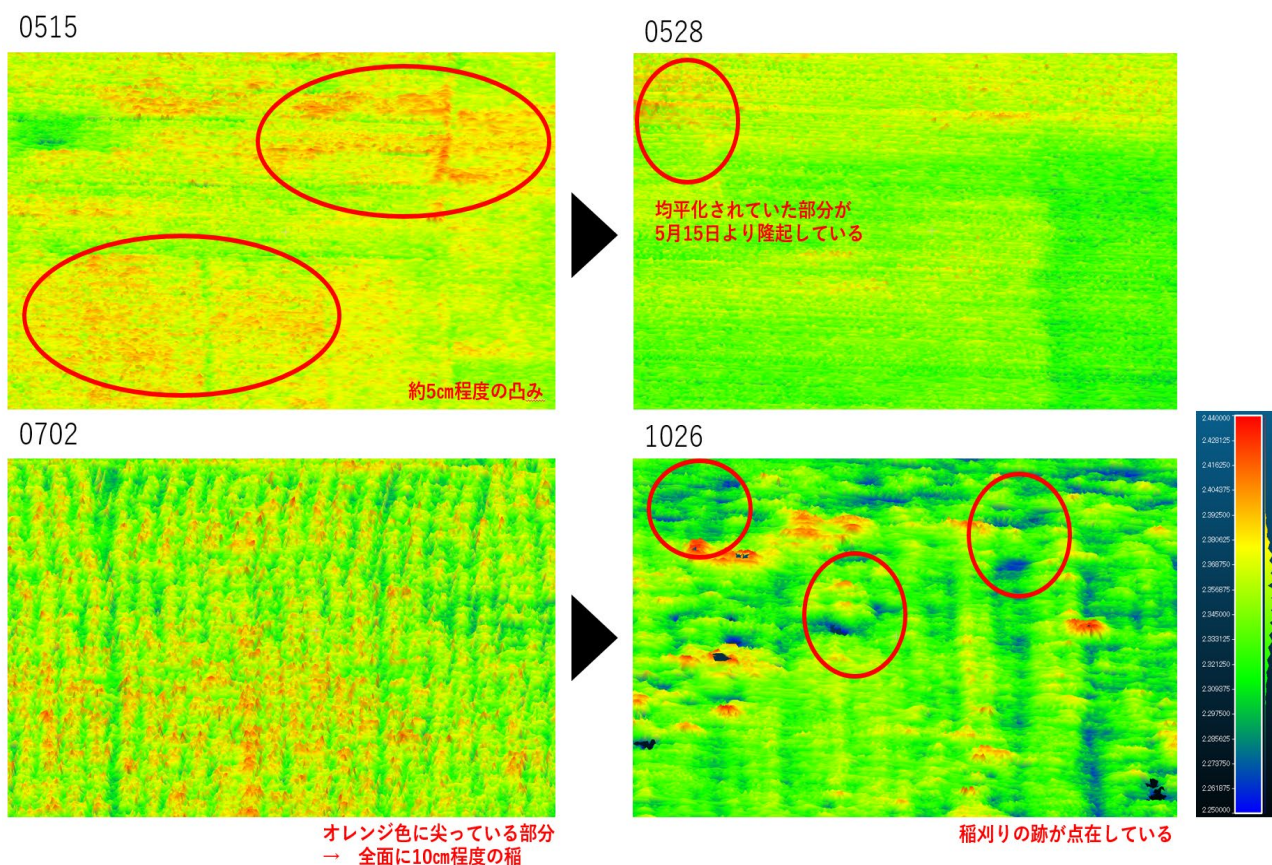


図 4.7-1 計測期間における A 圃場の標高段彩図の比較

次に B 圃場での比較について記述する。比較図は図 4.7-2 に示す。B 圃場では、5月15日にて約10 cmの凹み及び、約5 cm程度の凸みが存在する場所を抽出し拡大し、その部分を赤枠で示す。均平化作業後の5月2日では、この拡大部分全体ではならされているが、ここでもやはり一部均平化による効果が得られていない部分がある。7月2日は、A圃場と同じく全面に約10 cm程度の稲が点在していることが分かる。10月26日では、稲刈り後に計測を行っているため、稲刈り部分が顕著にへこんでいることがわかる。また、赤枠で示した部分は特に凹みが大きく、これはト

ラクターが通過した跡であると考えられる。標高段彩図を拡大しその前後の比較を行うことで、実際にはどのように均平化が進んでいるかまたその効果が表れていないかを部分的に把握し、圃場の不陸をより詳細に確認することが出来た²⁷⁾。

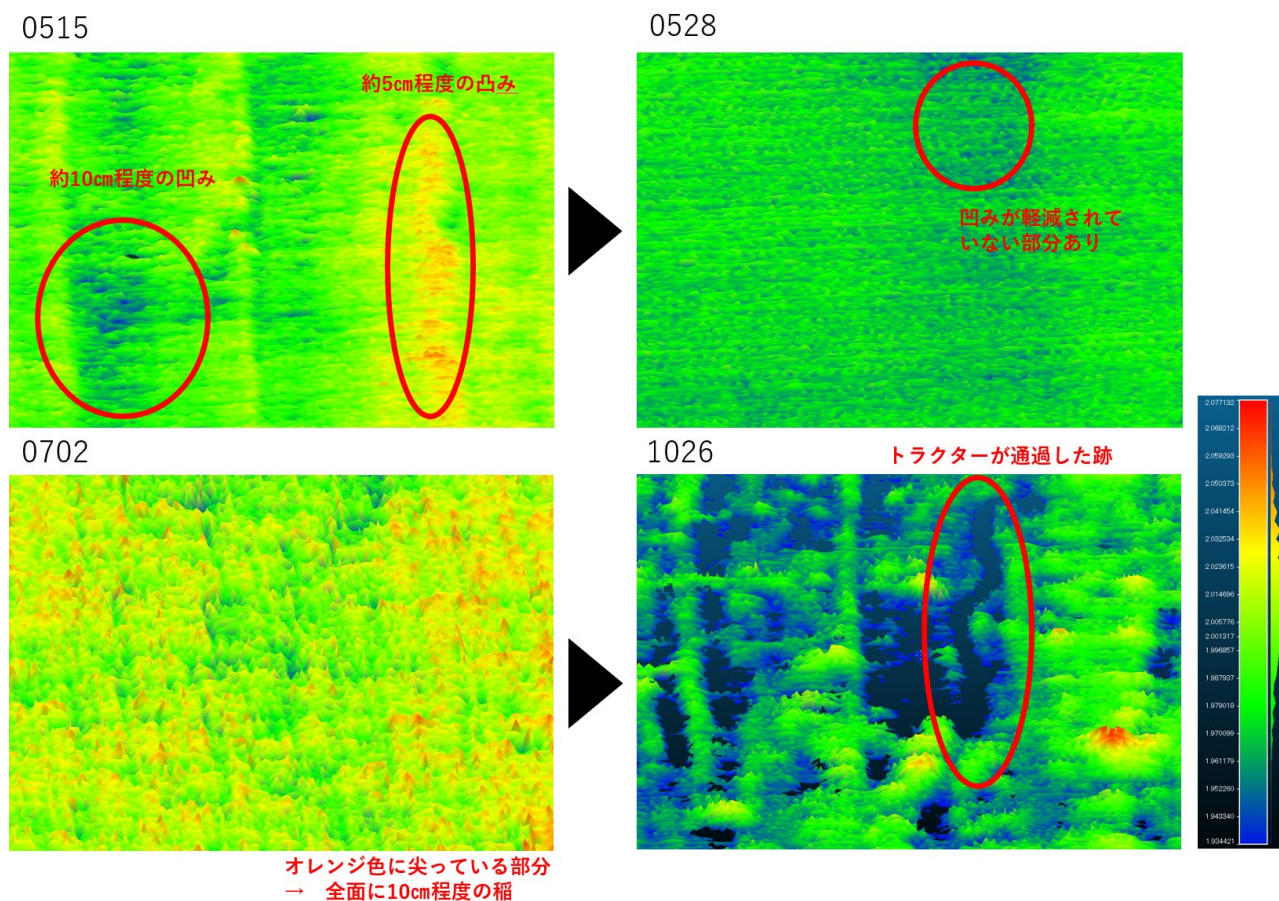


図 4.7-2 計測期間における B 圃場の標高段彩図の比較

4.8 不陸計測手法の検討

5月28日と7月2日における圃場 A における断面図を図 4.8-1, 4.8-2 にそれぞれ示す。5月28日において、断面図から、水面と水面底の地形が把握できる。特に黄色で示す最下点の点群から、水面がある状態でも地形の把握が出来たことが分かる。水面から最下点の水深はおよそ 13.4 cm 程度であった。また、稲と水面が混在する 7月2日の断面図においては、稲が既に出芽し 10 cm 程度苗立ちしており稲と水面が混在している。それによって稲の苗と水面の判断が断面図だけでは判断できないが、水底については最下点を抽出することによって断面図を得ることが出来た。

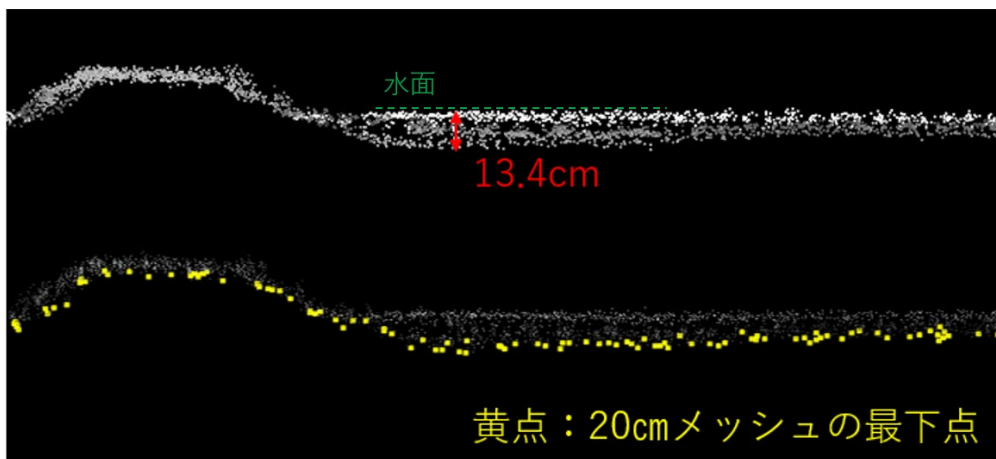


図 4.8-1 5月28日の三次元点群の断面図

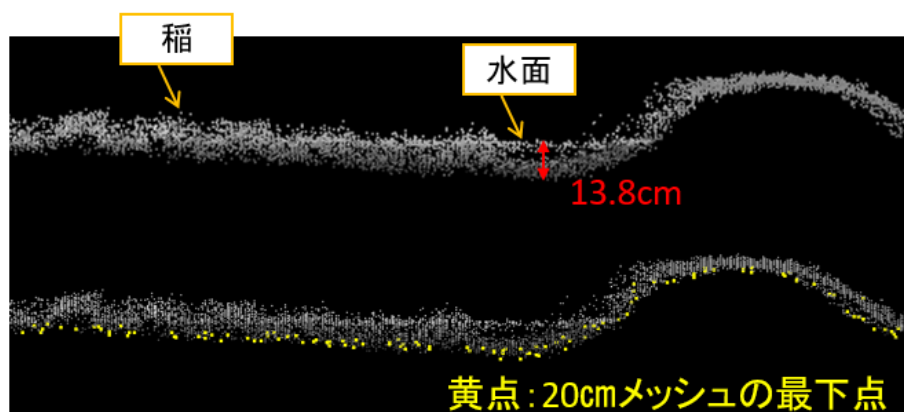


図 4.8-2 7月2日の三次元点群の断面図

次に、圃場 A 及び B における 4 回の計測のそれぞれの前後での均平の程度の比較を 2 時期分ずつ比較することで圃場の不陸の程度について評価する。圃場 A の断面位置を図 4.9-1 に示す。断面として抽出したのは赤線で示す位置だが、2 時期の均平化の変化が分かりやすいように黄色枠で囲んだ部分を切り取り断面図で表した。

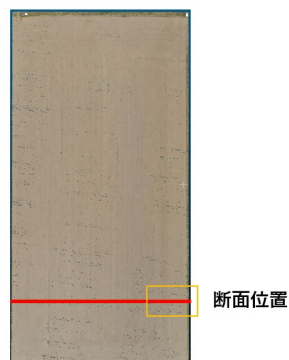


図 4.9-1 A 圃場における断面位置と拡大部の位置

図 4.9-2 から 4.9-4 に 4 回の計測の 2 時期毎の 5 月 15 日と 5 月 28 日，5 月 28 日と 7 月 2 日，7 月 2 日と 10 月 26 日の 3 回に分けて均平の程度がどのように変化しているかを示している．いずれの図も上部が断面位置での点群での比較，下部は上部で示した点群の最下点を線形に表した．最下点での線形での比較を行うことで水面下及び水面がない場合でも地形の評価を行った．5 月 15 日（1 度目の均平化）と 5 月 28 日（2 度目の均平化）では点群及び最下点線形においても同じような形をたどっている．そして，5 月 15 日から均平化作業後の 5 月 28 日の最下点線形の断面図では，畦畔を除く部分で，約 6.4 cm 程度均されていることが分かった．畦畔部分で約 16 cm の差が出てきているのはおそらく水深が深く，水深までレーザが届かなかった可能性がある．5 月 28 日と 7 月 2 日の比較を図 4.9-3 に示す．点群の比較では，7 月 2 日は稲が育っているため，地形と稲の判断が付きにくい．最下点線形で比較をすると，畦畔部分では約 6.7 cm 程度の標高差を確認できるが，畦畔を除いた部分では数 cm の標高差は確認できるがほぼ同じ傾向を示す．最後に 7 月 2 日と 10 月 26 日の比較を図 4.9-5 に示す．点群の比較では，点群の形だけでは判別が難しいが，線形の比較では，畦畔を除く部分で数 cm ほど標高差を確認でき，ほぼ同じ傾向を示している．

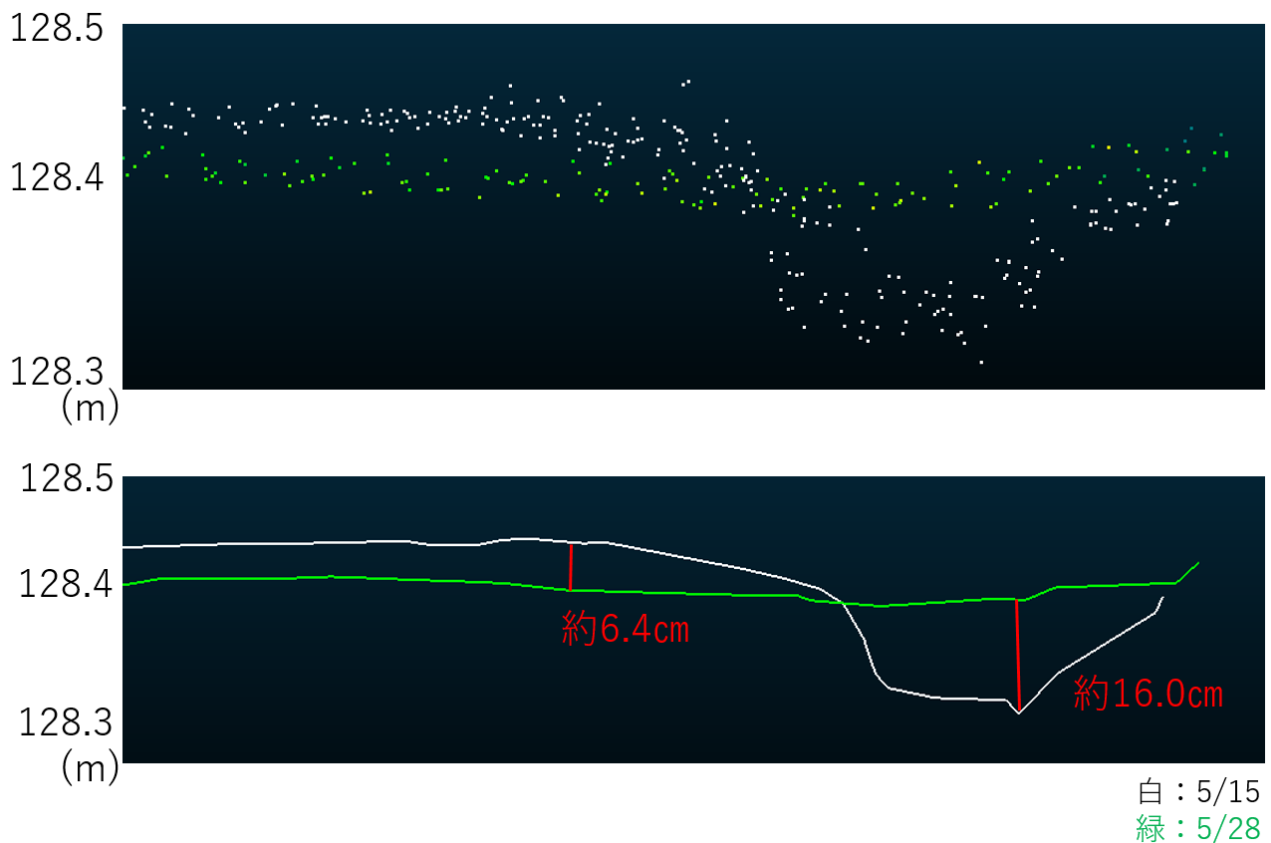


図 4.9-2 5/15 と 5/28 での A 圃場における断面図の比較

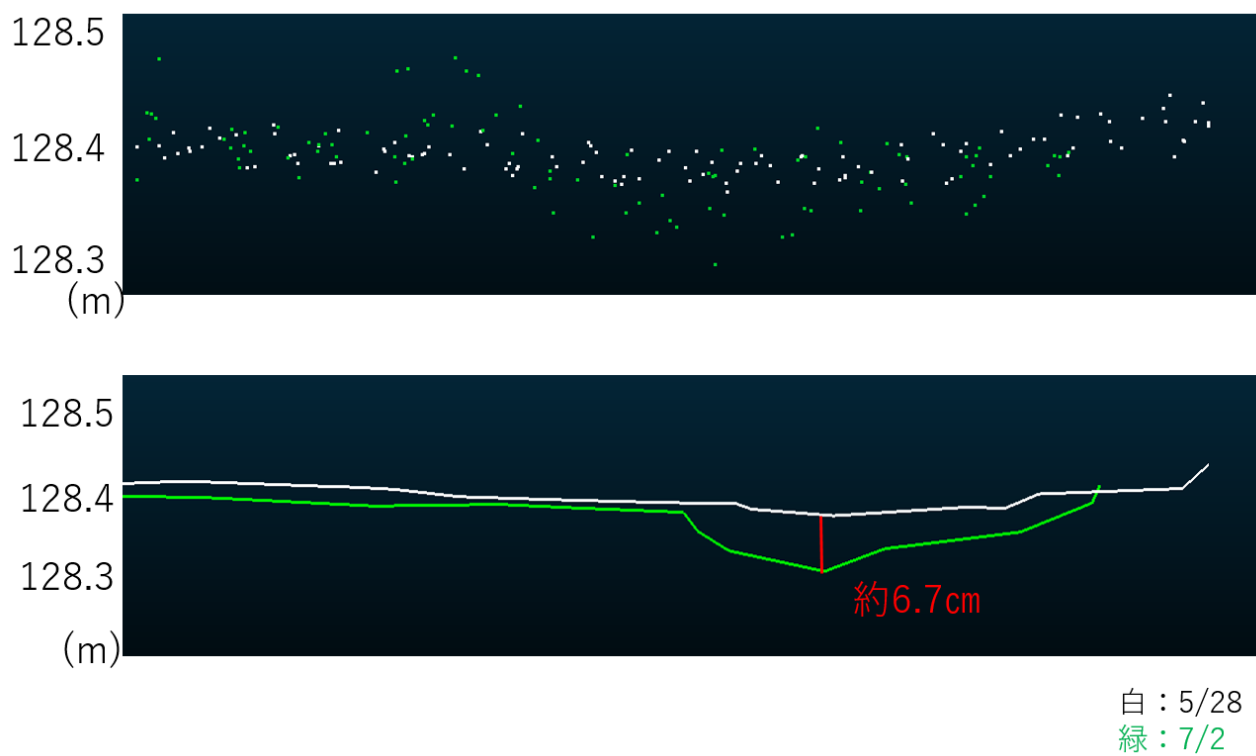


図 4.9-4. 5/28 と 7/2 での A 圃場における断面図の比較

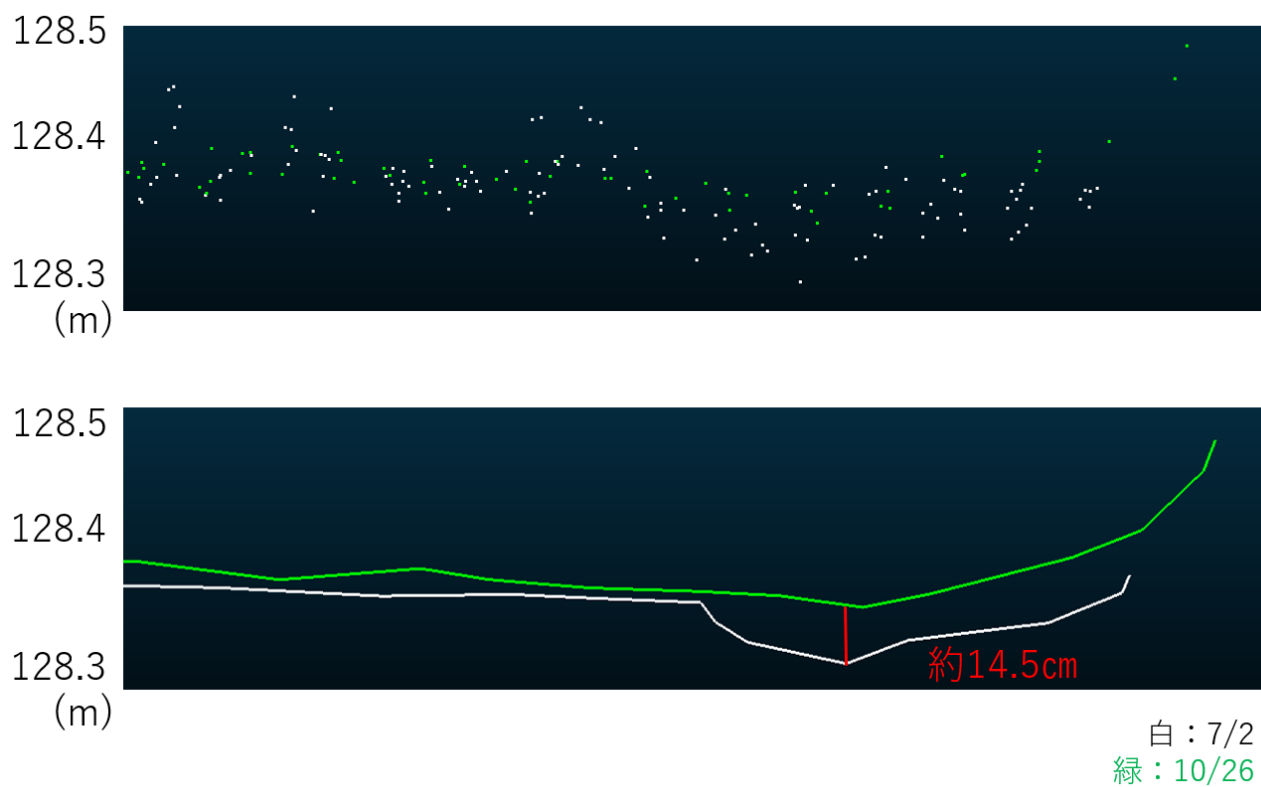


図 4.9-4 7/2 と 10/26 での A 圃場における断面図の比較

次に圃場 B の各時期における断面図の比較により圃場の均平化の程度を評価する．圃場 B における断面の位置とその拡大図の位置を図 4.9-5 に示す．拡大位置は 2 か所用いた²⁸⁾．

5 月 15 日と 5 月 28 日の点群及び，最下点線形の比較図を図 4.9-6 から 4.9-8 に示す．圃場 A と同じく，畦畔に約 15 cm 程度の標高の差が確認できる．畦畔部分を除いた部分では，点群も最下点線形もおおよそ 5 cm 程度減少しており，均平化作業で均されたことが分かる．7 月 2 日の点群・最下点線形ともに稲の影響を受けていることから，稲か，地形か判別がつかない．7 月 2 日と 10 月 26 日では，畦畔部分で最大約 15 cm 程度の標高差が確認できる²⁹⁾．

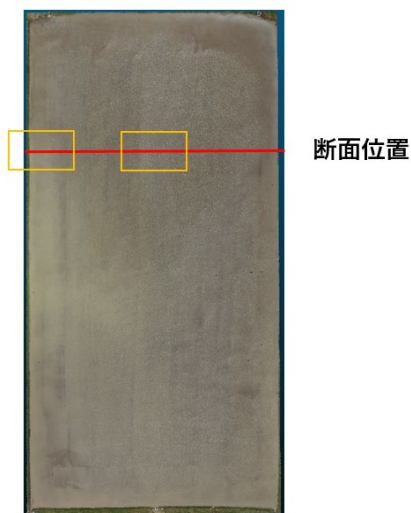


図 4.9-5 B 圃場における断面位置と拡大部の位置

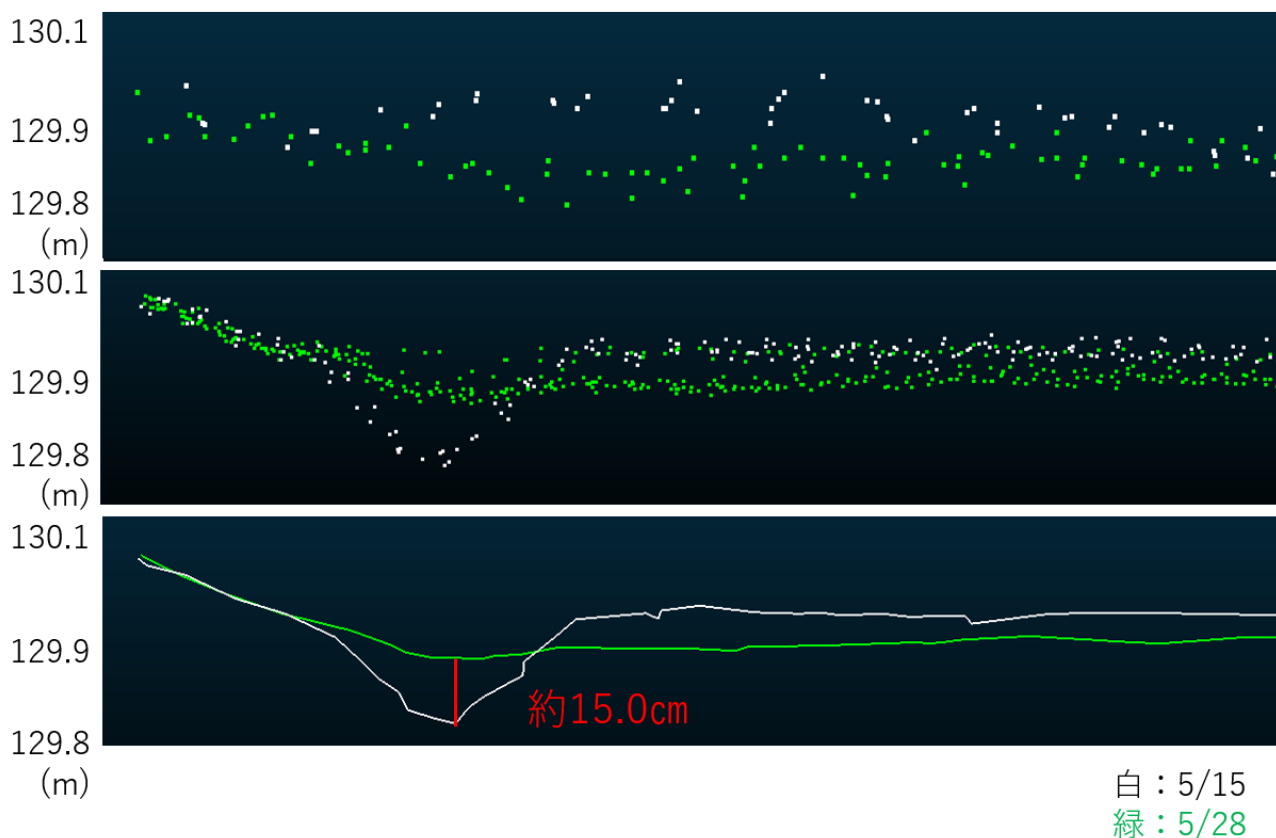


図 4.9-6 5/15 と 5/28 での B 圃場における断面図の比較

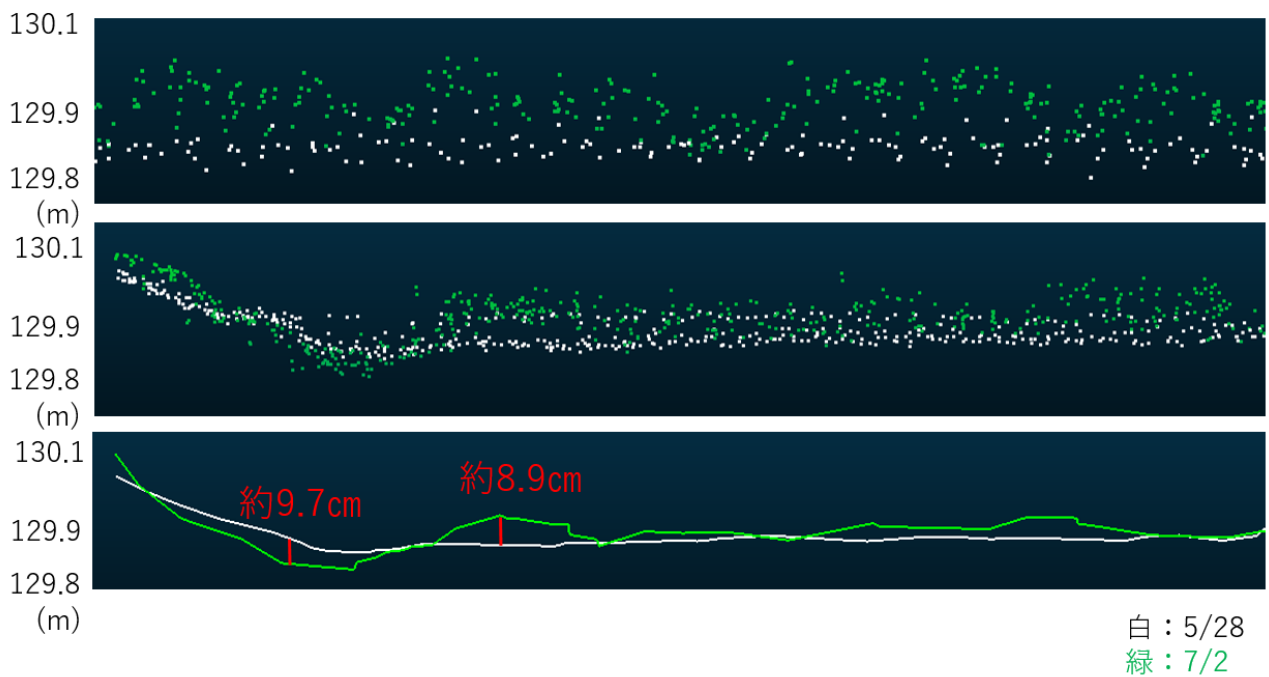


図 4.9-7 5/28 と 7/2 での B 圃場における断面図の比較

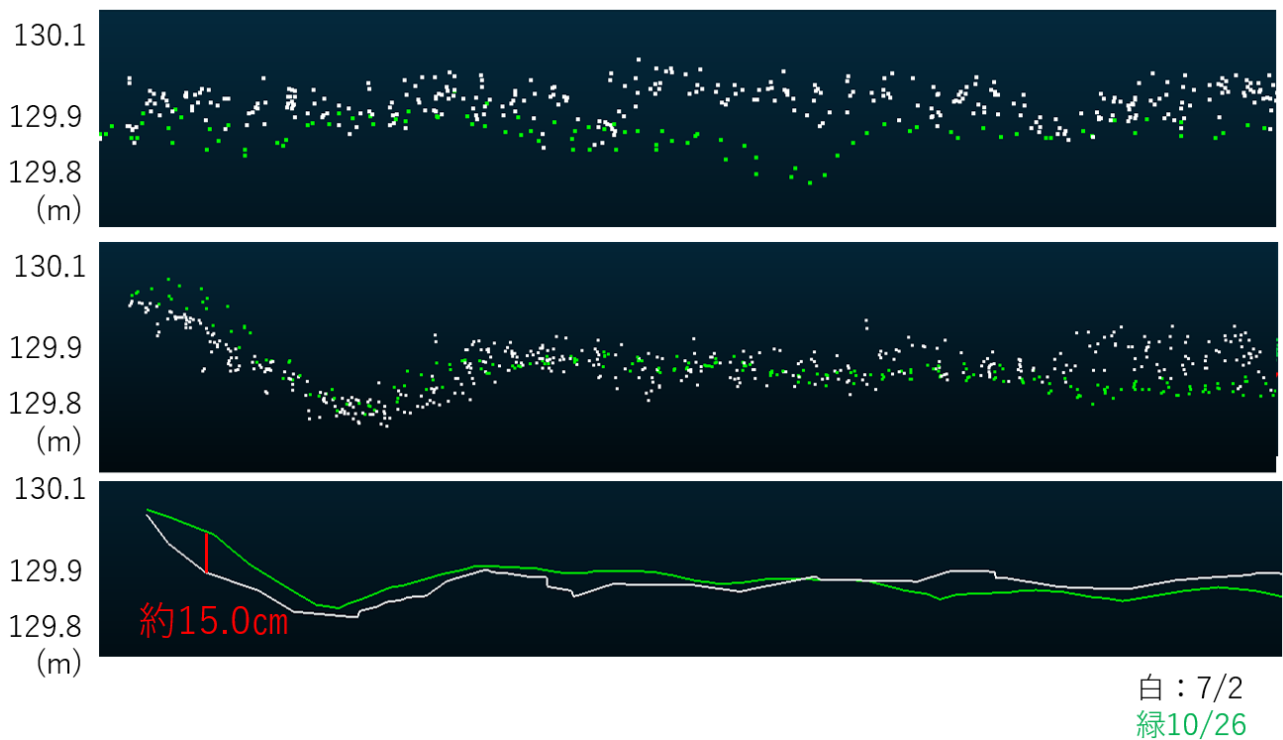


図 4.9-8 7/2 と 10/26 での B 圃場における断面図の比較

各時期の計測についての計測時間やコース数について、表 4.10-1 と図 4.10-2 に示す。本研究の対象地域の面積である約 76000 m²についての計測時間とコース数である。5 月 15 日、10 月 26 日は水田がなく UAV によるレーザ測量であることから、横方向の計測を行っていないため、他 2 計測と比較して計測時間が 60 分と 91 分と短い。5 月 28 日と 7 月 2 日はクロス方向に計測を追加しているため、それぞれ計測時間が 165 分と 135 分と 2 時間を超える計測となっている。

今後、農業分野特に水稲の直播栽培での UAV グリーンレーザ測量を実証していくためには、計測から解析までの時間的コストを減らすことも考慮しなければならない³⁰⁾³¹⁾。本検証では一度目の均平化作業からおおよそ 2 週間の期間を開け、2 回目の計測を行っているが、実際の直播栽培等の水稲農業では代掻きの作業は比較的短期間で行われる。一般的には 1 度目の均平化作業のあと、入水し、おおよそ 2～5 日後に 2 回目の均平化作業が行われる。均平化作業への効率化のための圃場不陸可視化の計測のため、よりリアルタイムで農家の方へのフィードバックが出来る環境を整えていくべきであり、そのために今回のような高密度・高精度な計測を行っていく中で計測条件を変えて計測していくのも課題のひとつである³²⁾³³⁾³⁴⁾。

表 4.10-1 計測についての時間・コース数

	計測時間	コース数
5月15日	60分	19
5月28日	165分	26(横断7コース含む)
7月2日	135分	26(横断7コース含む)
10月26日	91分	19



図 4.10-2 各計測における計測の飛行コース

第5章 海岸保全への応用

5.2 海岸保全への応用の背景

近年、地球温暖化が要因と言われる気候の変化による自然災害が多発する傾向にある。例えば、時間雨量 50mm 以上の豪雨の年間発生回数を見ると、1976 年から 1985 年までの 10 年間の年平均回数は 226 回であったものが、2014 年以降の年平均回数は 330 回と約 1.5 倍に増加している。また台風に伴って、線状降水帯と称される豪雨現象も頻繁に現れるようになり、河川災害だけでなく土石流や斜面崩壊といった土砂災害も頻発するようになった。そして今世紀末には、年最大流域平均降雨量が、全国平均で現在より約 1.1～1.3 倍増加することが予測されており、河道や河川管理施設あるいは斜面災害に対する有効な防災・減災対策の早期実施が要求されている¹⁾。しかしながら、河川防災は 200m 間隔で実施している河川縦横断の監視に基づき、これまでの経験に照らし合わせた判断で対策が決められているのが実情である。また土砂災害が発生する危険区域である土砂災害警戒区域は、全国で約 62 万カ所も存在しているが、河川と同じく人的な労力による目視点検の結果によって防災対策が立案されている。そこで河道などの実態を捉えて、有用な災害対策を考慮するための情報収集を行う計測機器の重要性が見直され、国土交通省により「革新的河川管理プロジェクト」が提案された²⁾。これは要求する技術の仕様や性能を実証するためのフィールドが国土交通省から示され、その要望に応える技術をもつ企業が、ピッチイベントを通して、短期間で実装まで仕上げるオープンイノベーション形式のプロジェクトである。その中で図 4.1-1 に示す「陸上・水中ドローン」が開発された。これは、それまでの近赤外域である約 900nm の波長域のレーザから、水中を透過する約 530nm の波長域のレーザ（以下、グリーンレーザ）を照射するドローン用のレーザスキャナを用いて、陸域と同時に水面下の 3 次元地形を計測するものである。図 4.1-2 は、この陸上・水中ドローンによって河床の地形を計測した事例である。図は河床の 3 次元地形を表す陰影起伏図および鳥瞰図と共に、任意の箇所での横断面図を示したものである。



図 5.1-1 グリーンレーザ照射スキャナ搭載ドローンの概観

図中の数字は水面から河床までの距離であり，図のような水深の浅い箇所では船舶を用いた計測は実施できず，河道の横断測量は人的な労力あるいは高コストである航空機を使ったレーザ測深（ALB：Airborne LiDAR Bathymetry）に頼らざるを得なかったが，「陸上・水中ドローン」の開発により，迅速かつ簡便に水面下の3次元地形を捉えることが出来るようになった³⁾。

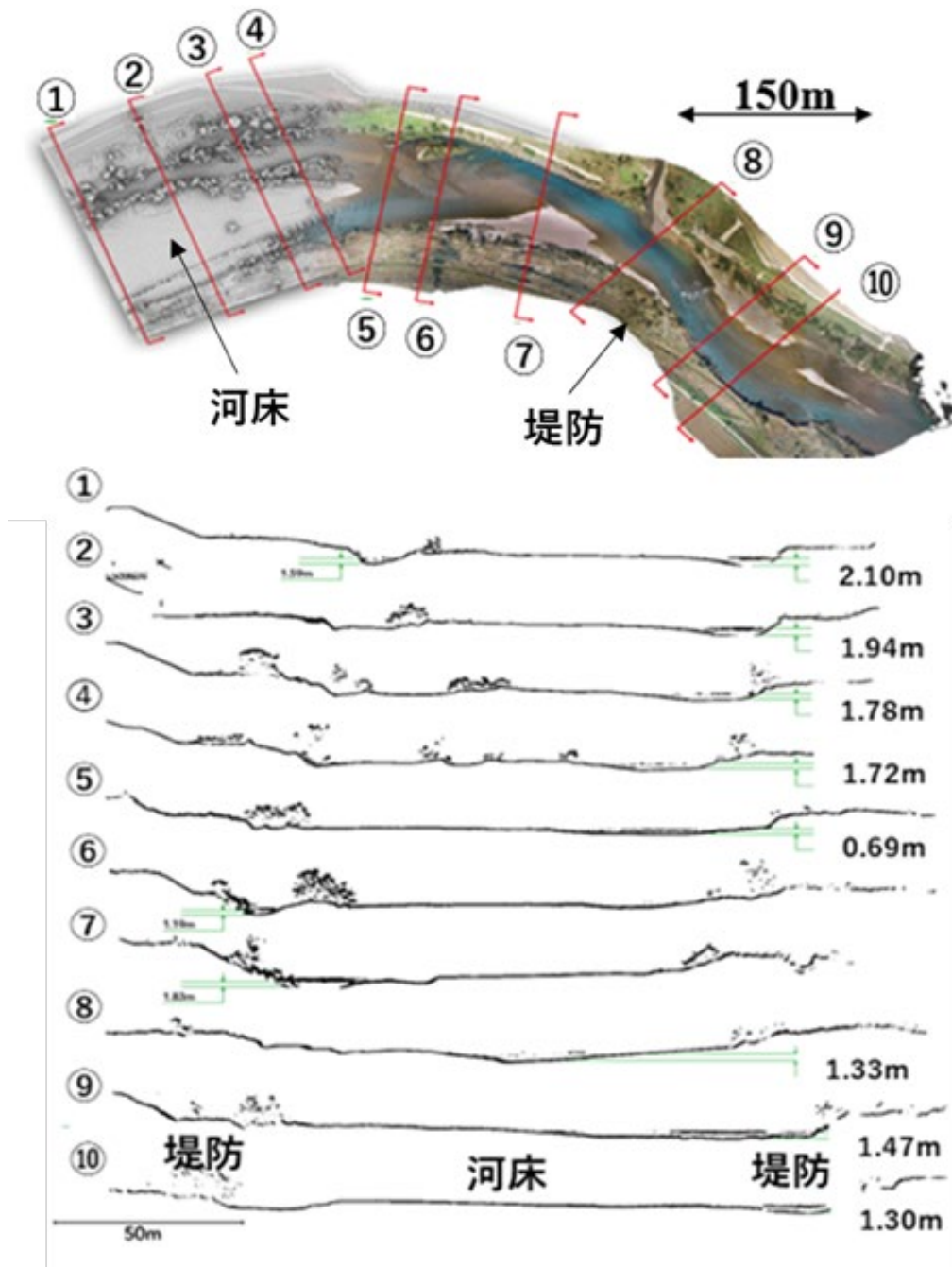


図 5.1-2 ドローンによる河道計測の例

しかしながら現在のドローンは，バッテリーで複数のプロペラを駆動するマルチコプター型が主流である．そのため搭載する機器の重量が増えるほど飛行時間は短くなり，ドローンによるレーザ計測を実用的なものにするためには，スキャナの軽量化を図る必要があった．グリーンレーザ光を照射するスキャナでは，ダイオードから発射された波長 800nm のレーザ光を変調して作成するが，機器の一部に光ファイバーを使用するなどの工夫により，総重量は 3kg 以下と軽量化さ

れている³⁾。それでもマルチコプター型のドローンの飛行時間は30分より短く、広範囲の対象を計測するには頻繁にバッテリー交換をする必要があり、効率の良い計測とは言えない状況である。河道計測への応用を考えると、国と県が管理する河川の総延長は144,020kmにもなり、公共事業予算の縮小や土木技術者が減少する中で、河川全域の状況を把握し管理することを考えると、作業効率の良くないドローンの適用は難しい。また山間部などの第3者が立ち入る可能性が低い場所では、補助者の配置なしで目視範囲外の航行ができるレベル3飛行が可能だが、ドローンが1度に航行する範囲が狭いため、土砂災害危険区域の対象となる斜面全体を計測できない事例が多い。このように防災情報収集という目的に対して、ドローン計測を十分に活用できていないのが実情である⁴⁾。

これまで長時間飛行を可能にするドローンも存在しているが、垂直離着陸機（VTOL: Vertical Take Off and Landing）型が主流である⁵⁾。有人機のVTOLとしてはオスプレイが有名であるが、機体の前進速度によって発生する揚力を利用する固定翼と回転翼を組み合わせることで、長距離飛行を可能にするものである。しかしながら、回転翼と固定翼の両方の飛行機構が必要になるために機体の小型化が困難であり、運搬に労力を要する。その他、固定翼による長時間航行のドローンも開発されているが、VTOLと同様に主翼にかかる揚力によって自重を支えているため高速での移動になる⁶⁾。一方、3次元レーザ計測の多くは低速の飛行あるいはホバリング時に実施されるので、計測の用途としてはマルチコプター型ドローンが便利である⁷⁾。このような背景を鑑み、本研究ではグリーンレーザスキャナを搭載して長時間航行が可能なドローンの開発を試みる。具体的には、ガソリンを燃料とした発電機による給電システムを用いることで長時間航行が可能となるマルチコプター型の陸上・水中ドローンの開発を試みた。このようなガソリン駆動のエンジンを搭載することで長時間航行を可能にした本研究と同じハイブリッド型のドローンも実用化されているが、機体重量は100kgとなり運搬は容易ではない⁸⁾。本研究は、災害地の情報を迅速に取得できるように、運搬が容易な機体重量10kg以下の機動性が良好なドローンの開発を試みる。

さらに本研究では、長時間航行可能なドローンによって取得された点群を処理するアルゴリズムを開発する。ALBによって取得されるレーザ点群密度は、陸部では約数10点/m²であるが、ドローンを用いた計測では数100点/m²以上の高密度となる。さらに長時間航行のドローンを使用する場合、広範囲を対象とするので取得される点群も容量が大きなビッグデータになる。したがって、長時間航行のドローンの開発においては、データ処理法を同時に検討することが重要となる。例えば、水中下の地形データを計測した場合、どこがどのように変状したのかを把握する必要がある。さらに災害被災地の地形を計測した場合は、迅速な被災状況の定量化が求められる。それらの要求に対して、長時間航行による広範囲の計測データはビッグデータとなるため、計測された3次元データを比較する作業には多大な労力を要し、またレーザ点群で表現された対象の2時期のデータから変状を定量化する作業も経験を伴う熟練が要求される。したがって迅速な対応ができるドローン計測を実現させても、データ処理に労力が要求されるのでは、長時間航行のドローンにて情報を収集する利点が少なくなる。そこで本研究では、2時期の点群データを重ね合わせ、その結果から変状が発生した個所を可視化する自動処理アルゴリズムを開発する。これまで点群を重ね合わせる手法としては代表的なものにICP（Iterative Closest Point）が知られている^{9), 10)}。これは2時期の点群データに対してそれぞれの最近傍点を探索し、対応点間の距離の総和が最小になるように反復計算して点群を重ね合わせる手法である。点群処理では最もよく用いられる汎用化された手法であるが、点群全体で座標値が一致しない対応点が多くなる、あるいは点群間の距離が大きくなると収束が困難となる課題がある。そのため広範囲の点群データに適用する場合、計算の安定性が保証されない課題が生じる。そこで本研究では、収束計算させる前に、2時期の点群の重心を一致させる平行移動を行うことで対応点間の距離を小さくし、さらに距離の総和を評価するのではなく回転操作によって対応点間の座標を一致させるアルゴリズム

ムの有用性を検証する。本研究は長時間航行のドローンと取得したビッグデータ処理を合わせて開発するものであり、今後の防災・減災対策立案のための効率的な情報収集手法の実現に貢献できると考える。

ここでは既存の沿岸域計測手法として、マルチビーム音響測深と ALB (Airborne Laser Bathymetry)を紹介する。ナローマルチビーム音響測深は、船舶に取り付けたソナーヘッド(送受波機)から音波を送信し、海底に反射した音波を受信するまでの時間を測定して反射面の 3 次元データを取得するものである。ナローマルチビームによる海底地形計測の概念図を図 5.1-3 に示す。音波は最大 160° までの扇状に送信でき、水深 7000m の深海の海底地形計測が可能なことから、海洋における海底地形計測手法の最も広く使用されている計測法である。一方で本研究の対象である沿岸部においては、浅瀬や岩礁・消波ブロック帯周辺などの計測が困難であり、計測できたとしても点密度が小さく、精度の低い計測となる。

マルチビームによる音響測深のシステムは大別すると以下の 3 つで構成される。

- (1)GNSS(地上及び航空機)・・・3次元空間位置(X,Y,Z)の特定
- (2)動揺計測装置・・・・・・・・・・測量船のロール(横方向の揺れ), ピッチ(縦方向の揺れ), ヒープ(上下動), 船首方向の測定
- (3)音響測深装置・・・・・・・・・・マルチビーム方式による面的な測深値(Z 値)の取得

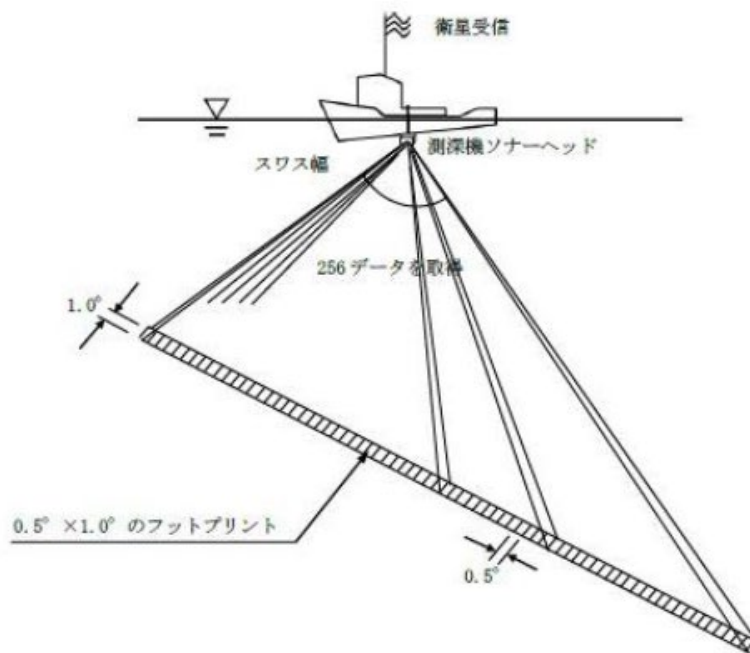
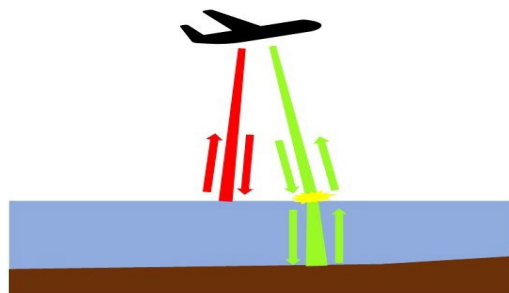


図 5.1-3 マルチビーム測定のイメージ

ALB (Airborne Laser Bathymetry)とは、航空機から近赤外レーザとグリーンレーザを照射して、水面から反射してくる近赤外レーザと水中を透過して水底から反射してくるグリーンレーザの反射時間の差から水深を求める計測システムである。図 5.1-4 に ALB の概念図を示す。測深可能な深さは、水中での光エネルギーの散乱、減衰、反射(底質の硬さ)の作用によって決まるもので、中でも濁度の影響を最も受ける。目安としては水の透明度の 1.5~2.0 倍で概ね水深 15m 前後までの測深が可能である。また、レーザと同時に計測する中盤デジタルカメラは、可視画像と近

赤外画像を同時に撮影でき、解像度は対地高度 500m で 5cm とされる。ALB の利点は人や船が干潟や河口などの浅瀬や浅海部を測量できる点にあり、ナローマルチビームによる音響測深との併用により、水陸一体で地形情報の整備を行っている。しかし、航空機による測量であることから、



迅速かつ低コスト化の対応が困難である。さらに、400m 以上の対地高度から計測するため、陸域で約 8 点/m²、水中域では約 1 点/m² という低密度のレーザ点群取得となる。

図 5.1-4 マルチビーム測量のイメージ

5.2 海岸保全用計測機器のハード仕様

本章では長時間航行するドローンに関するハードの開発内容と、計測したデータの精度を検証した実験の結果を示す。また計測を目的に開発したドローンであることの有用性を検証するため、これまで計測が困難とされていた沿岸域のサンゴ礁を含んだ地形の計測へ応用した例を示す。マルチコプター型ドローンは、ローターによりプロペラを回転させることで空気に鉛直下向きの運動量を与え、その反作用で揚力を得て飛行する。機体が重い場合は、より大きな揚力を発生させる必要があるために、ローターの回転数を上げることが要求され、結果として消費電力が大きくなる。また同一機体で飛行時間が長くなると、消費電力自体は変化しなくても、電力を消費する時間が長くなる。すなわち、機体が重いあるいは飛行時間が長いどちらの場合も消費電力量は大きくなる。航行に必要な電力は、ペイロードに対して指数関数的に増加する特徴があり、動力源であるバッテリーの容量を増加させると、逆に消費電力の増加も大きくなるので、ドローンの飛行時間が低下する。このように、ペイロードと称される機体の質量と飛行時間はトレードオフの関係になる課題があり、長時間航行するドローンの実現は困難であった¹¹⁾。

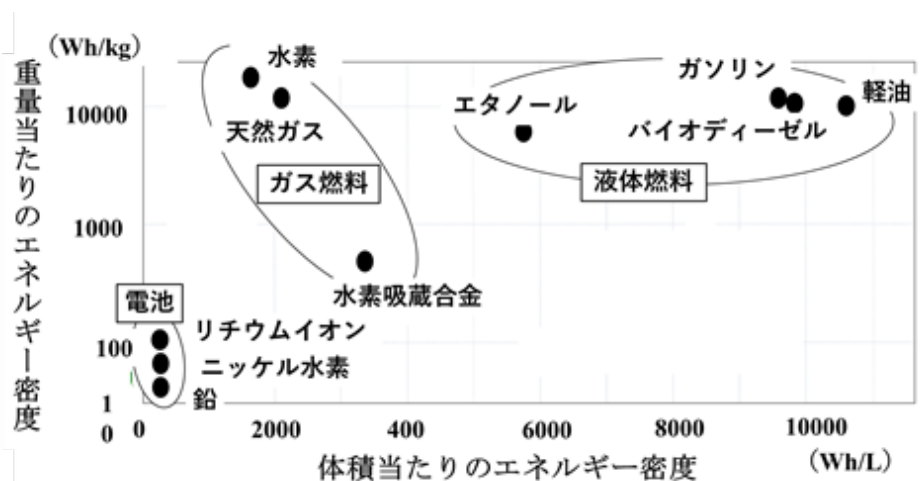


図 5.2-1 各種動力源と燃料のエネルギー密度



図 5.2-2 ガソリンエンジンを使った発電機システムの概要

図 5.2-1 は、電池、気体燃料あるいは液体燃料から取り出すことができるエネルギー量の単位体積または単位質量当りの値を示すものである¹²⁾。動力源として使用する場合は、横軸が大きくなるほど軽量化ができ、縦軸が大きくなるほど小型化ができる。この図から分かるように、動力源を電池とするには限界があり、ドローンでは現状の電池より液体燃料を使用した方の利点大きい。そこで本研究では、ガソリンで動くエンジンによる発電機を搭載し、これによってリチウムイオンポリマー電池を給電しながら飛行するシステムを開発した。図 4.4-2 はシステムにおける回路構成の概要で、電気自動車の航続距離の延長を目的に使用されるレンジエクステンダーを基にして、エンジンとスターターおよび発電機を一体化した約 300mm の大きさの発電機を実現させた。発電機を構成するエンジンは 2 ストロークであり、高トルクの出力を産み出しながらも部品手数が少なく簡単な構造になるという長所を活用した。ただし騒音が大きく、また排ガスに含まれる未燃焼ガスや一酸化炭素が多いので環境負荷に対する課題がある。そこで、プロペラを動かす動力源としてエンジンを使用するのではなく、プロペラを回転させる電池に給電するシステムとしてエンジンを利用することで長時間航行を実現させる。図 5.2-3 は開発したドローンの概観であり、総重量 10 kg 以下で小型であるため運搬が容易で、現地にすばやく持ち込めることで迅速な計測の実施を可能にする¹³⁾。

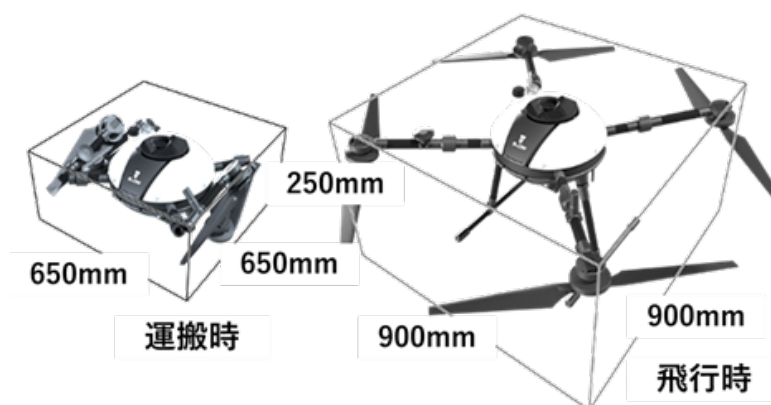


図 5.2-3 開発した長時間航行ドローンの概観

ドローンを使った測量において、測量精度に影響を及ぼす自己位置および姿勢の計測は、GNSS および IMU（慣性計測装置：Inertial Measurement Unit）の各センサによって行われる。しかしながら、ドローンは時速 25km/h 以上で飛行するので、GNSS を使った自己測位の際、0.1 秒の誤差があれば位置にして約 0.7m の誤差が発生する。GNSS における誤差は様々な要因で発生するが、上空の電離層における電波信号の遅延が最も大きな影響を及ぼす。そこで本研究では、衛星からの 575.42MHz 帯の L1 信号と 1227.60MHz 帯の L2 信号の 2 種類の信号を受信することで電離層による信号遅延を補正して測位の精度を高め、ドローンの位置誤差を数 mm の誤差で取得する。さらに測量精度は、この GNSS がもつ精度にレーザの測距精度を加えたものとなるが、レーザスキャン角度が鉛直方向から離れるほど、レーザ照射時のドローンの姿勢が測量精度に影響する。そこで FOV（視野角：Field of View）と称されるレーザ光のスキャン範囲を鉛直方向から左右 45° の領域に制限し、ドローンの姿勢が IMU の計測値へ及ぼす影響を少なくした。このような工夫により、ドローンによる測量精度の向上を図った。

表 5.2-1 グリーンレーザスキャナの仕様

レーザ波長	532±1nm
発射レート	60,000Hz
スキャン速度	30走査/s
視野角 (FOV)	90°(±45°)
重量	2.7kg
ビーム拡がり角	1.5mrad
レーザクラス	3R

表 5.2-1 および図 5.2-4 は、ドローンに搭載したグリーンレーザスキャナの性能の仕様と長時間航行ドローンの概観である。なおスキャナを含めたドローンの総重量は、約 12kg である。図 4.2-5 に示すように、調整点および検証点として図に示す対空標識を設置し、その中心の座標を開発したドローンで計測する。また国土地理院認定 3 級の ±(5mm+5ppm×D：D は測定距離 (mm)) の精度をもつトータルステーション（以下、TS）でも計測し、その値と比較することでドローン計測の標高値の精度を検証した。なお精度は次の式にて算出した。

$$DIS = OBS - TV \quad (1)$$

$$\text{平均較差} = \frac{\sum DIS}{n} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{(\sum DIS^2)}{n}} \quad (3)$$

ここで DIS ：較差， OBS ：ドローンによる観測値， TV ：TS による測量値， $\overline{DIS}$ ：較差の平均値， n ：検証点，数， $RMSE$ ：平均二乗誤差 (Root Mean Square Error)。

ドローンの自己測位は、計測時に取得した GNSS データを PPK 方式 (Post Processing Kinematic：後処理キネマティック方式) を使って求めた。PPK 方式とは計測値を基準点で取得したデータで補正する方法であり、本研究では周囲の電子基準点を使って設けた仮想基準点を使用した。表

5.2-2 に結果を示す。国土交通省国土地理院「作業規程の準則」では、現地に設置した標定点の値を用いて調整することで、標高精度の RMSE を 100mm 以内にするのが要求されている¹⁴⁾。広範囲の対象を計測する際には、この標定点の設置作業に要する労力が多大になるという課題がある。検証結果では、標定点の座標値を使って補正すると平均較差は高精度になる傾向は見られたが、標定点による補正を実施しなくても要求精度以内の精度は確保できることが示された。このように、開発したドローンは、現地に標定点を設ける労力を要することなく、高精度の計測が可能であることが分かった。

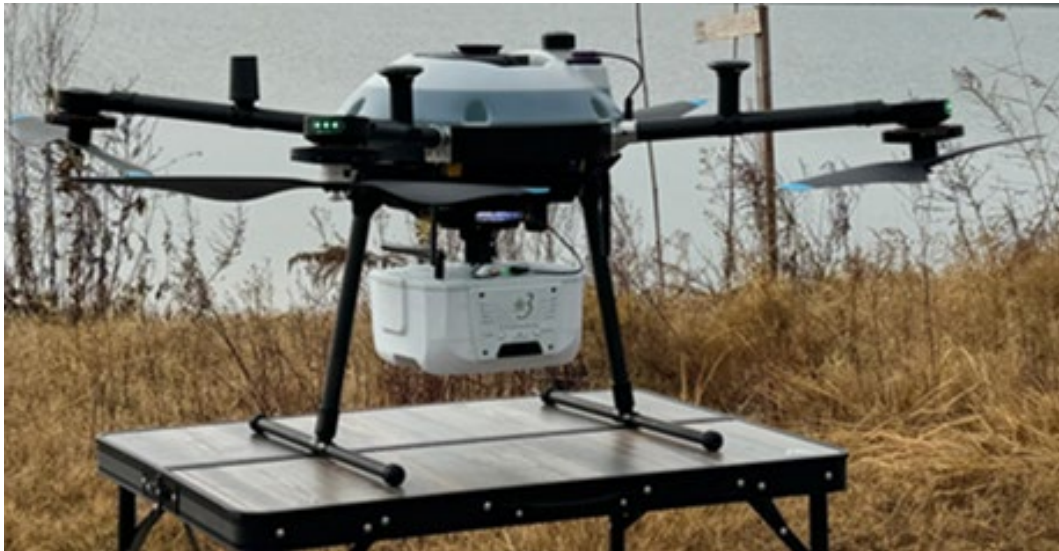


図 5.2-4 グリーンレーザスキャナを搭載したドローンの概観

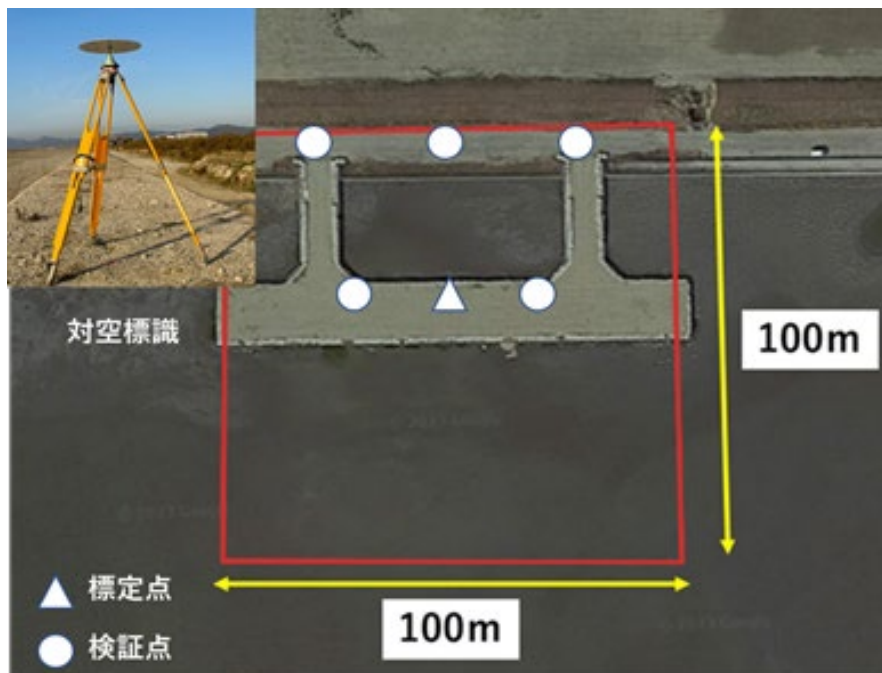


図 5.2-5 精度検証実験を行った実験場の概要

表 5.2-2 精度検証実験の結果

単位(m)	検証点	較差	平均較差	RMS
標定点での 補正無し	No.1	0.056	0.042	0.049
	No.2	0.095		
	No.3	-0.039		
	No.4	0.083		
	No.5	0.017		
標定点での 補正あり	No.1	0.011	0.006	0.061
	No.2	0.096		
	No.3	-0.083		
	No.4	0.037		
	No.5	-0.033		

5.3 海岸保全への応用事例

本節では、サンゴ礁の礁縁部の砕波帯に発達する縁脚-縁溝系地形となっている沿岸域の計測を実施した事例を示す。尾根部である縁脚と谷生である縁溝とが外洋に向かって交互に配列する櫛の歯状の形態は、波浪に対する消波効果を有している。現在、温室効果による海面上昇が沿岸域の生態系の変化を引き起こしており、例えば海面上昇によるサンゴ礁の侵食により消波効果が薄れることで、沿岸に押し寄せる波浪強度が増大するという防災上の問題が生じている。そのため、サンゴ礁の実態を把握するための計測データを取得し、経時変化を注意深く観察する必要が提唱されている¹⁵⁾。しかしながら、測深が可能な船舶を用いた音響測深技術は、水深が数 m の沿岸部には調査船が入ることができず実施できない。そのため沿岸域の海底地形の計測は、海岸から測線に沿って移動する潜水夫が計測しているが、サンゴ礁は波浪の影響を強く受ける砕波帯に位置するため、潜水調査が可能な波浪条件となる頻度は極めて低く、実態調査は十分行われてこなかった。近年は衛星画像や写真測量を使った調査が報告されているが、得られる情報は平面形に過ぎず、断面形は把握できていないことで、結果として日本のサンゴ礁地域の環境変化に伴う実態の変化は把握されていないままであった。そこで本研究で開発したドローンを用いたグリーンレーザ計測が実施された¹⁶⁾。なお「航空レーザ測深機を用いた公共測量マニュアル（案）」（国土交通省 平成 31 年）においては、有人の航空機に搭載されたグリーンレーザではあるが、その水中の測深能力は透明度に依存することが示されている¹⁷⁾。グリーンレーザを使用した測量を実施する際には、直径 30cm のセッキ板を現位置にて沈め、目視できる水深をもってグリーンレーザが到達する水深を確認することが推奨されている。本研究においても、同じ手法を用いることにより、水深約 10m の地形を測量できることを確認した。

図 5.3-1 は計測の対象区域である。なお図には砕波の状況も示す。1 回のドローン航行は 2 時間であり、1 度だけガソリンの給油を行った合計 2 回の航行で、全長 2.6km、幅 1km の範囲を計測することができた。計測作業はドローンに搭載している GNSS を使い、あらかじめプログラムされた飛行ルートに従って自律航行することで自動的に実施された。図 5.3-2 はレーザ点群間隔 0.12m にて水深約 10.7m までの計測結果を可視化したものである。波浪はレーザ光を透過し難い

という課題があり，図のような砕波の領域は低速で航行させることで波浪の影響を減じる必要があった．これまでの飛行時間が約 30 分のドローンでは，往復に要する時間を考慮すると本現場のような遠距離までの広範囲の計測を低速で実施することは困難であった．本研究により，これまで整備されてこなかった浅海域の海底地形図の作成が可能になり，沿岸部のサンゴ礁の実態を把握する計測手法が実現する可能性を示すことができた¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾．

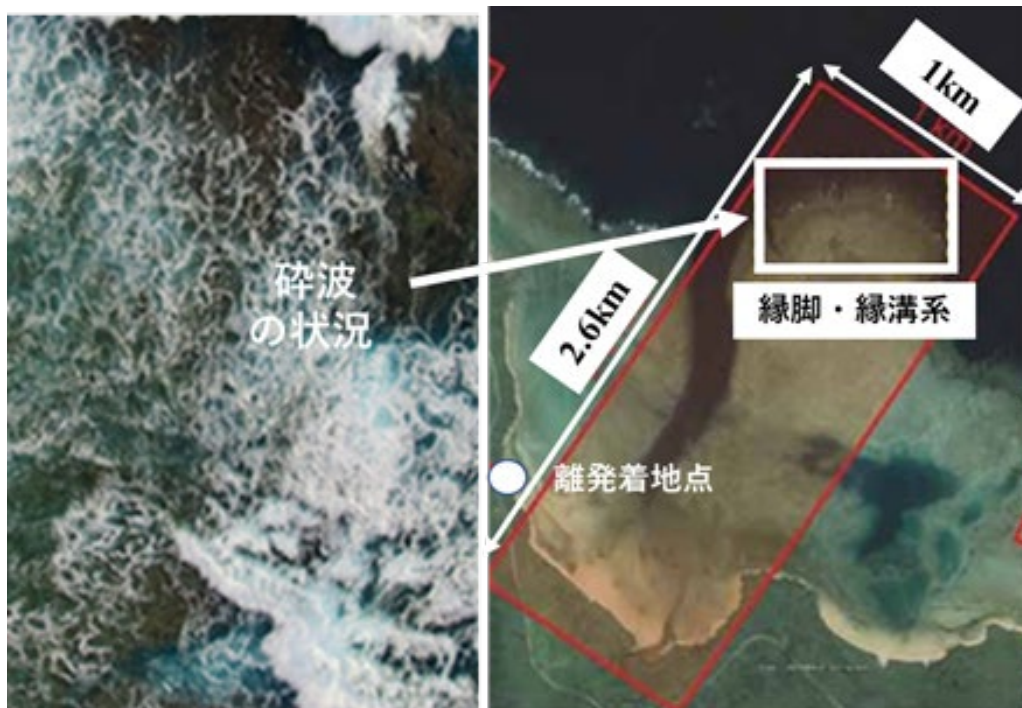


図 5.3-1 長時間航行ドローンの計測対象

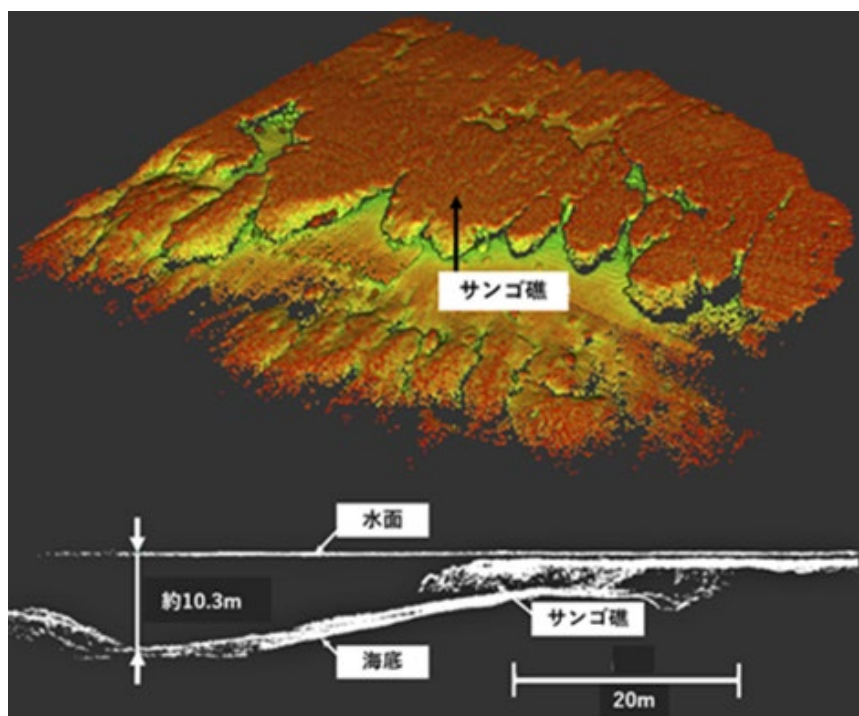


図 5.3-2 長時間航行ドローンの計測結果

次に2時期の点群データを重ね合わせ、その結果から変状が発生した個所を可視化する自動処理アルゴリズムの開発成果を記述する。またアルゴリズムを応用した事例として、沿岸域の地形の変化を可視化したものを示す。前章でも検討した浅海域を含む広範囲の沿岸域は、これまでのドローンあるいはその他の手法での計測が困難な対象であり、本研究の有用性を明確にできる対象であると考え²⁰⁾²¹⁾。

開発したアルゴリズムは次の通りである。

1 時期目の点群を x_i 、2 時期目の点群を y_i とすると、異なる2 時期に計測された各点群から成る図形を重ね合わせる操作は式 (4) のように表すことができる。

$$x_i = s * M * (y_i - t) + v_i \quad i = 1, \dots, n \quad (4)$$

s : 図形のスケーリング比, M : 回転行列, t : 並進ベクトル, v_i : 残差である。

この式 (4) の v_i の2 乗和が最小になるように、点群 y_i から成る図形にスケーリング、並進および回転操作を行ない、点群 x_i から成る図形に重ね合わせる。ここでは1 時期目の点群 x_i 、2 時期目の点群 y_i から成る図形の重心を式 (5) のように求める。

$$x_g = (\sum x_i)/n \quad y_g = (\sum y_i)/n \quad (5)$$

重心を原点とした座標値を用いて x_i 、 y_i を式 (6) のように書き換える。

$$x_i = x_i - x_g \quad y_i = y_i - y_g \quad i = 1, \dots, n \quad (6)$$

それぞれの点群から成る3次元図形において、各点の重心からの距離の2乗和の平方根を計算し、式 (7) によりスケーリング比を算出する。

$$s = \left\{ \frac{\sum \|x_i\|^2}{\sum \|y_i\|^2} \right\}^{1/2} \quad (7)$$

このスケーリング比を2 時期目の点群 y_i から成る図形に掛け合わせる。

$$y_i = s y_i \quad i = 1, \dots, n \quad (8)$$

これらの操作を含めて、点群を重ね合わせる計算式を導く。式 (4) の f_i を式 (9) とおく。

$$f_i = s * M * (y_i - t) \quad (9)$$

式 (4) をテータ展開によって線形化する。

$$v_i + \begin{bmatrix} \frac{\partial f_i}{\partial s} & \frac{\partial f_i}{\partial \theta} & \frac{\partial f_i}{\partial \varphi} & \frac{\partial f_i}{\partial \kappa} & \frac{\partial f_i}{\partial t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta s \\ \Delta \theta \\ \Delta \varphi \\ \Delta \kappa \\ \Delta t \end{bmatrix} = x_i - f_i \quad i = 1, \dots, n \quad (10)$$

線形化の係数は次の通りである。

$$\frac{\partial f_i}{\partial s} = M * (y_i - t)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial \theta} = s * M_\kappa * M_\varphi * \frac{\partial M_\theta}{\partial \theta} * (y_i - t) \quad (11)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial \kappa} = s * \frac{\partial M_\kappa}{\partial \kappa} * M_\varphi * M_\theta * (y_i - t)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} = -s * M$$

ここでは、 y_i から成る図形を、 Y 軸を中心に右ねじの方向に θ 回転させ、 Z 軸を中心に左ねじの方向に φ 回転させ、そして X 軸を中心に右ねじの方向に κ 回転させる操作を表す回転行列を、そ

れぞれ M_θ , M_φ , M_κ としている.

式(10)を式(12)のように書く.

$$v_i + AY = e \quad (12)$$

Y は点群 y_i の補正量である. 残差ベクトルの 2 乗 $v_i^T v_i = (e - AY)^T (e - AY)$ の最小解は $\frac{\partial v_i^T v_i}{\partial Y}$ の極値から次のように求めることができる.

$$Y = (A^T A)^{-1} A^T e \quad (13)$$

この最小二乗解を繰り返し計算により求めることで, 図形を重ね合わせる. この重ね合わせ結果を可視化することで, 重ね合わせることでできない箇所を変状発生個所として容易に認識することができる.

なお, Y の期待値は $\hat{Y}$ 式(14)となる.

$$E\{\hat{Y}\} = (A^T A)^{-1} A^T E\{e\} \quad (14)$$

式(12)の両辺の期待値を計算すると $E\{v_i\} = 0$ となる.

これより $AE\{Y\} = E\{e\}$ となるので式 (15) を得る.

$$E\{\hat{Y}\} = (A^T A)^{-1} A^T E\{e\} = E\{Y\} \quad (15)$$

すなわち, 求める解は不偏推定量であることが証明される.

ここに開発したアルゴリズムを沿岸域の保全のための計測技術として応用した事例を示す. 我が国沿岸に存在する数少ない自然海岸は, エコツーリズムなどを通して地域社会の活性化につながる付加価値をもつ. その一方で, 水陸域両方の環境変化に大きく影響されるため, 保全対策が困難であり, 自然海岸は消失する傾向にある. 例えば, 丸みを帯びた石英が 65%以上含まれ, 外部より急激な力を加えると音を発する砂で構成される砂浜は「鳴き砂」として知られており, 保全のための努力が続けられている. 具体的には, 破碎による波の洗浄効果が発揮される沖合のバーでの置砂が検討されるが, 一方では沖合のバーの地形変化により碎波現象が変わり, 結果として置砂の効果が発揮されないという矛盾も発生する. したがって, 海底地形の変化を詳細に捉える計測技術は, 海浜の環境保全には必須なものであるが, これまでは, 水深が数 m の遠浅部分は調査船が入ることが難しいため, 置砂実施時などでの海底の微地形の変化を把握できる手法がなく, 船舶を使わない計測法の応用が望まれていた²²⁾²³⁾. 図 5.3-3 は天然記念物に指定されている「鳴き砂」海岸をドローンによるグリーンレーザで計測した結果であり, 陸域から沖合約 4km の海域の 2 時期にわたる地形を陰影起伏図によって表現したものである. 図のように, 陸域では蛇行する河川の河口形状と河床の地形の変化が再現されている. また海陸境界部では波打ち際で急激に深くなるステップ地形の後退が把握できている. さらに沖合バー地形の変化も可視化されている. 本研究で開発したアルゴリズムを用いて 2 時期の地形を重ね合わせ, 海浜地形の変化を表現したのが図 4.4-4 である. 図 5.3-3 においては, バーの消失やステップ地形の後退を, 定性的にしか把握できなかったが, 図 5.3-4 が示す地形の変化より, その範囲と規模を定量化することができた. 当初見られたバーは消失しており, 海底は広い範囲で平坦化していることが分かる. また陸域の河口位置は東に大きく移動し, ステップ位置も陸側に後退する, あるいはステップ陸側ではアーチ状の汀線形状がリズミカルに連なるビーチカスプが発達したという変化が捉えられている. これら波打った汀線形状や汀線付近に形成されるビーチカスプなどは, 砂浜への波浪の影響を考慮するために重要となる地形である. 10 月から 12 月の 2 か月間の海底地形の変化を詳細に捉えることができ, 置砂の実施に向けての基礎的資料を作成することが可能となった²⁴⁾.

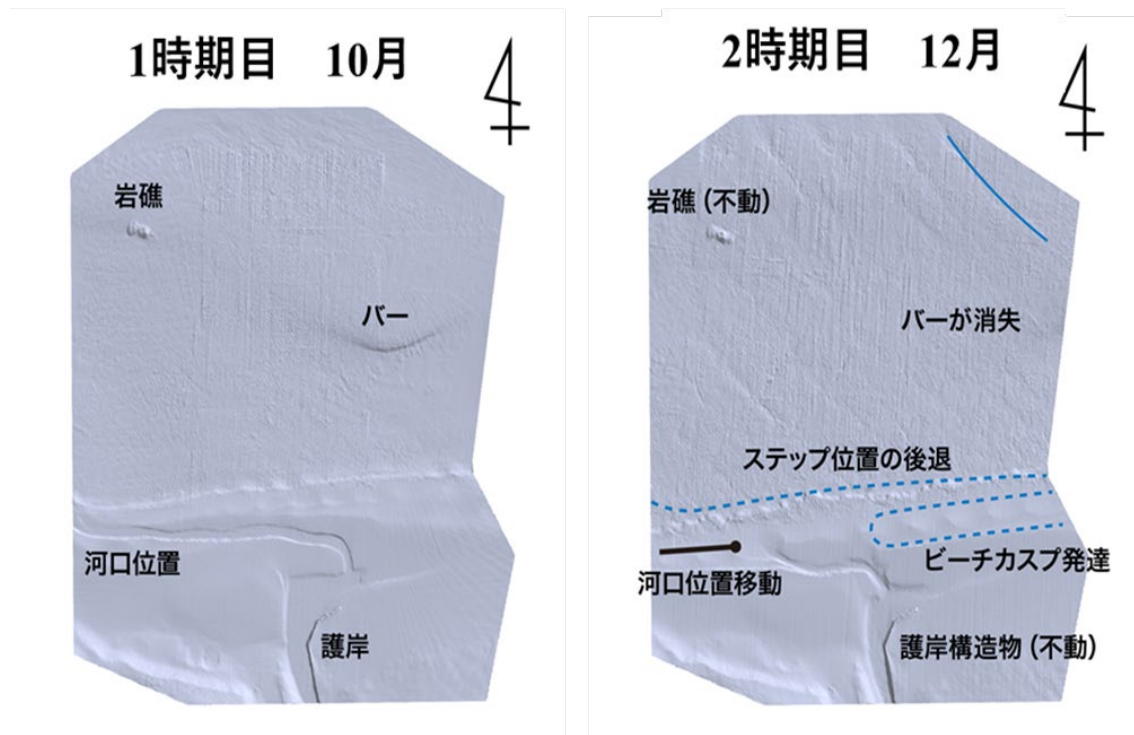


図 5.3-3 長時間航行ドローンによる沿岸域の計測結果

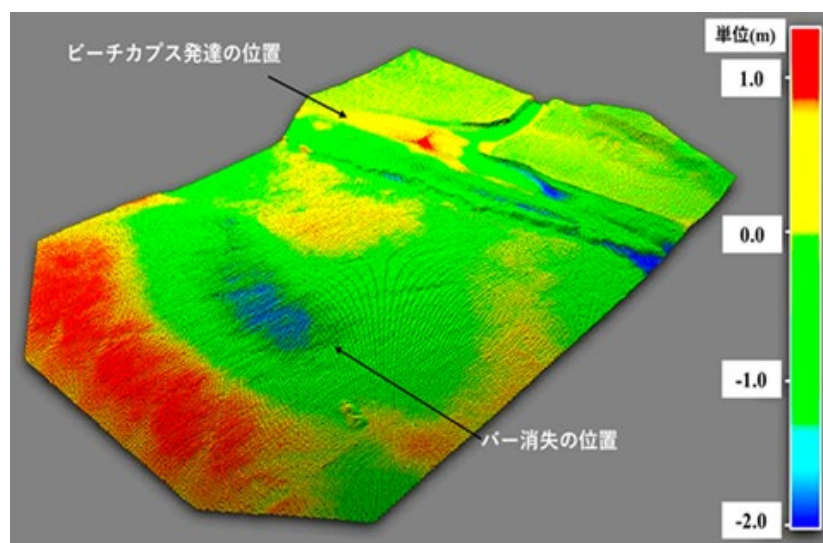


図 5.3-4 2 時期重ね合わせアルゴリズムの実行結果

本研究によるドローン計測による海底地形の可視化は，例えば台風などの波浪来襲直後の変化の把握も迅速に行うことができ，沿岸域の実態調査の進展に貢献するものと考え^{25) 26)}。

本アルゴリズムの妥当性を検討するために，2 時期の横断面を比較した結果を図 4.4-5 に示す。青色の実線が 1 時期目，赤色の実線が 2 時期目である。図中の数字は 2 時期の標高値の変化を表したものである。No. 3，No. 4 および No. 5 の断面において，約 1.5m の標高の変化としてバーの消失が見られている。また No. 1 から No. 9 の断面の変化により，ステップ位置の後退が分かる。これらの結果は，図 5.3-4 にて可視化した海浜地形の変化と類似したものとなり，アルゴリ

ズムが捉えた海底下の堆積域と浸食域の変化が計測できる可能性を示していると考える。また開発したアルゴリズムは海底地形の変化を面的に可視化するので、図 4.4-5 のような断面形を作成しなくても、図 4.4-4 のように地形の変化を視覚的に捉えることができるという有用性を示すことができたと考える。

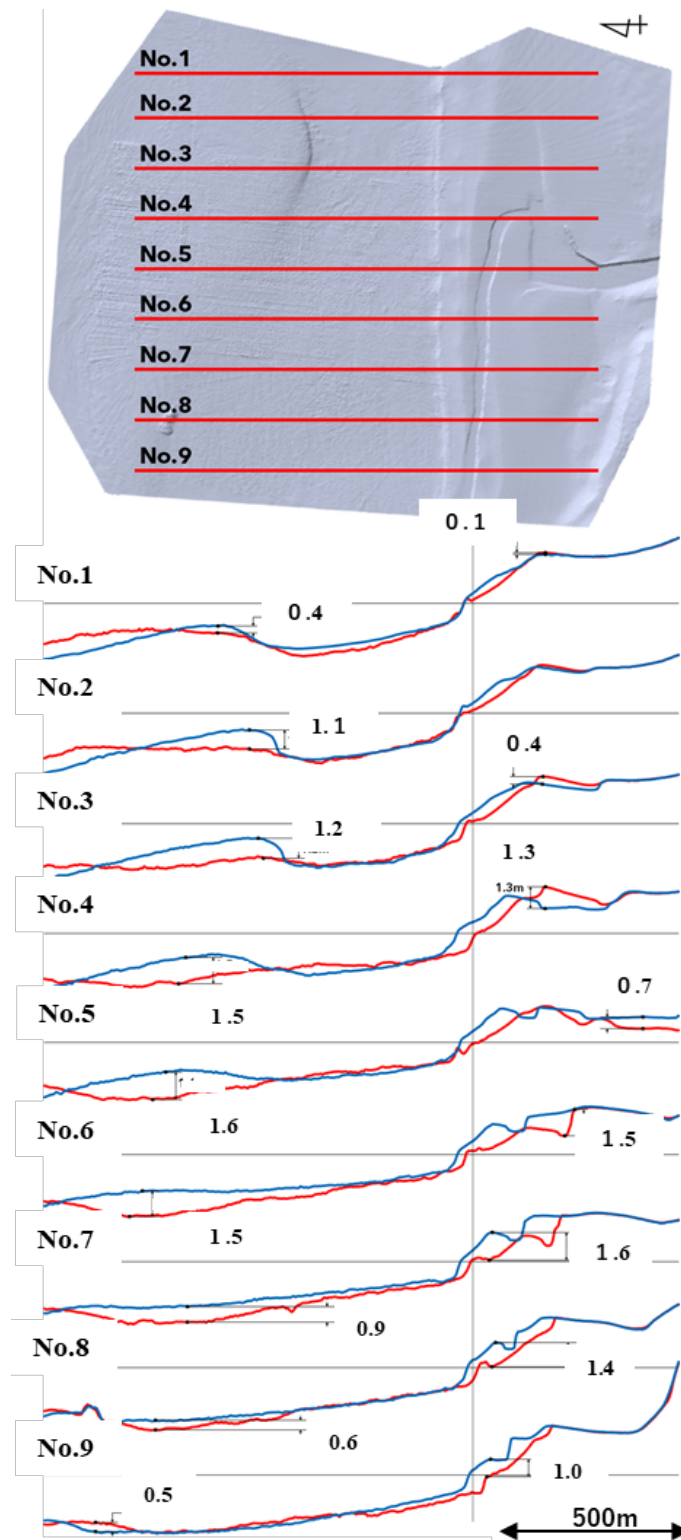


図 5.3-5 時期の海底地形の変化。図中の数字の単位は m

5.4 海岸保全計測の実用性の評価

図 5.4-1 に点群データを取得した計測現場と示す。計測場所は三重県南部の熊野市から紀宝超まで約 22km 続く海岸である、七里御浜海岸の一部(海岸沿い方向約 400m, 沖合方向約 350m の範囲)で実施した。七里御浜海岸は日本最長の砂礫海岸であるとともに、熊野川におけるダム建設や土砂採取などを要因とした海岸侵食が顕在化している。そのため、潜堤や消波ブロック・離岸堤など様々な海岸侵食対策工が施されているものの、侵食傾向は改善されていないのが現状である³²⁾。計測は 1 時期目と 2 時期目に分けて行い、1 時期目は 7 月 20 日、2 時期目は 11 月 24 日に実施した。ドローンは DJI の Phantom4-RTK、スキャナはアミューズワンセルフ社の TDOT GREEN を使用した。ドローンの飛行時間は両時期とも約 1 時間 20 分で、対地高度 60m、飛行速度 3m/s、サイドラップ率を 28% で計測を行った。また、調整点・検証点をそれぞれ 3 点ずつ、図中に示す位置に設置し、点群の位置調整と点群取得精度の検証を行った。



図 5.4-1 計測範囲と標準点の位置

図 5.4-2 に測量によって得られた点群データの標高段彩図を示す。図中の水色部の変動から、約 4 か月間で地形が大きく変状していることが分かる。三重県御浜の観測地では、8 月 11 日から 21 日までの 10 日間にわたり降雨が続き、8 月 17 日には三重県内で 1 時間に約 120mm の猛烈な雨を観測している。これらは 1 時期目と 2 時期目の測量間に発生しており、これらの影響により海岸地形が大きく変状したと考えられる。本現場では海岸線上に消波ブロックが設置されており、2 時期目のデータからは、消波ブロックの背後は海岸の侵食が抑制されている部分がある。このことから、海岸侵食対策工の効果が実際に表れていることが分かる。このようにドローンによる 3 次元データ取得によって海岸の状態を把握することができる。

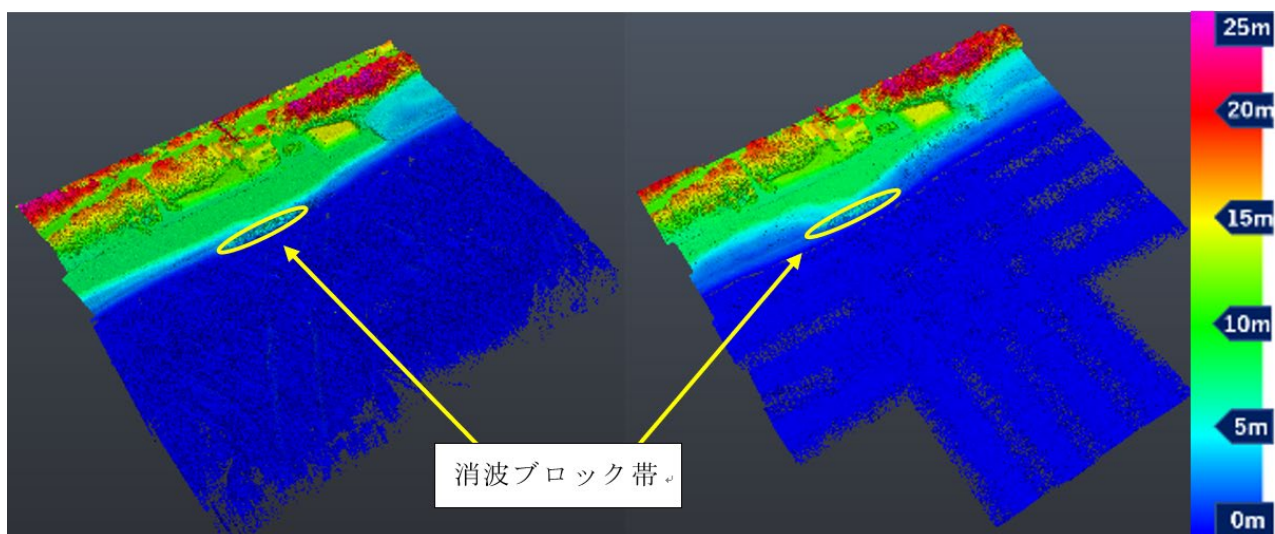


図 5.4-2 左：1 時期目の計測結果 右：2 時期目の計測結果

計測では，計測範囲内に調整点と検証点をそれぞれ 3 点ずつ設置した．これらの標準点を用いて，GNSS 測量によって得られた座標との比較から精度検証を行った．図-3.3 に固定局と検証点の図を示す．水中には標準点を設置できないため，陸部のみの精度検証となるが，陸部の取得精度を検証することは沿岸域における水陸一体の 3 次元データを扱うために重要である．1 時期目，2 時期目ともに測量誤差の平均と標準偏差を算出した．その結果を図-3.4 に示す．調整点との誤差は 1 時期目 2 時期目とも標準偏差で最大 0.35mm と $\pm 50\text{mm}$ を下回っており，調整点なしでも十分精度の高い点群データを得ることが可能であるといえる．また，検証点との誤差に関しては，1 時期目は標準偏差約 10mm，2 時期目は標準偏差約 30mm となり，許容誤差の $\pm 50\text{mm}$ を下回る結果となった．しかし，沿岸域においての計測では，調整点が海岸沿いの 3 点のみであり，また水中に調整点を設置できないことから，点群データの面的な位置調整が困難である．また，水中の精度検証も行うことができないため，今後は水中における取得点群精度の検証方法を検討する必要があるといえる．

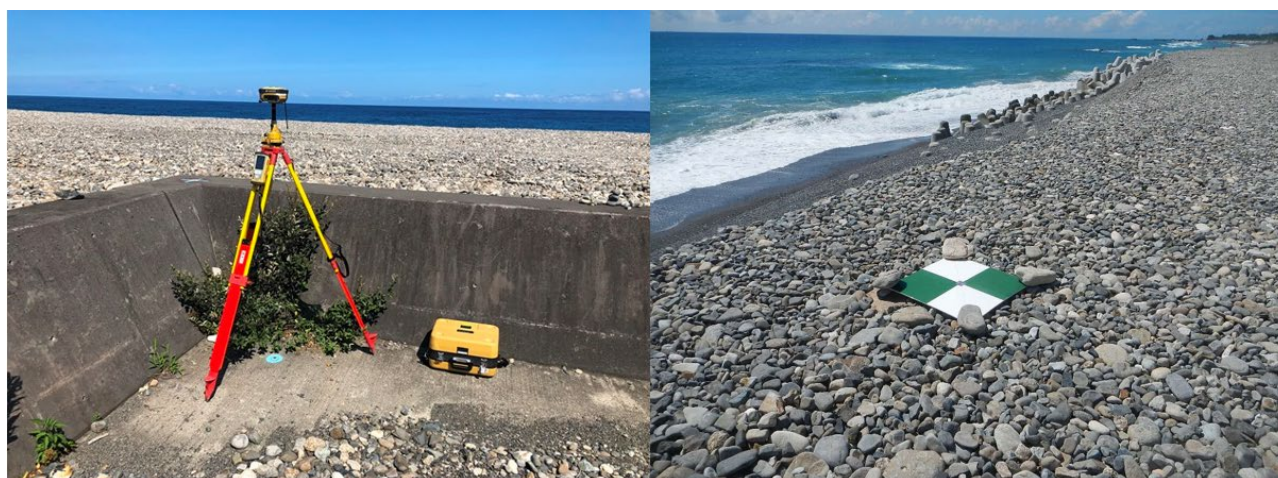


図 5.4-3 左：固定局における GNSS 受信機 右：検証点の外観

取得した点群データから 1 時期目・2 時期目それぞれのデータにおいて 2 か所の断面を抽出した。図 5.4-4 に 1 時期目の抽出位置と断面図，図 5.4-5 に 2 時期目の抽出位置と断面図をそれぞれ示す。断面図において緑色の点群は陸部，水色の点群は海面のデータを表しているが，1 時期目の測量では海底の点群データが全く取得できず，海面データの特定ができなかったため，オルソ画像に基づいて配色を施した。1 時期目の測量では先述のように海底の点群データが取得できておらず，陸と海の境目である汀線の位置を把握できなかった。抽出した断面に限らず，どの場所においても海底地形データが取得できていなかった。この原因としては様々な影響が考えられるが，海洋の状態が最も影響していると考えられる。これまでの航空レーザ測深技術に関する研究¹¹⁾では，グリーンレーザを大きく減衰させる要因としては，水中の懸濁物質による散乱のほか，水中の有食溶存有機物によるグリーンレーザの吸収，水面上で発生する白波等によるグリーンレーザの反射，水底部の低反射物質によるグリーンレーザ反射量の減少などが指摘されている。その中でも特に白波の発生は目視によって確認でき，上空から撮影したオルソ画像からも 1 時期目は 2 時期目に比べて白波が多く発生していることが分かる。このような理由から 1 時期目の測量に関しては，白波の発生によって水中の点群データが取得できなかったと考える。

2 時期目の測量では水深 0~6m のほとんどの範囲において海底の点群データを取得することができた。断面図からは最大 6.3m の点群データを取得することができ，ステップやバームなどの海岸地形がみられた。しかし，どの断面図も共通して汀線付近での欠測が確認された。これらの欠測も波の影響が大きいと考えられる。汀線付近では波の状態が不規則になるため海水が白く濁る。そのため，グリーンレーザが散乱したためであると考えられる。このように，沿岸域におけるグリーンレーザによるドローン測量では，白波の発生が計測能力に大きく影響していると考えられる。白波発生は主に風速の上昇によって発生する。沖合では風速が約 5m/s に達すると発生し，風速の増加につれて発生頻度が増すと考えられており，測量の際には風速や波の状態を把握しておくことが重要であると考えられる。また，この節以降水中の点群データに関する解析はすべて 2 時期目に取得した点群データを使用して行う。

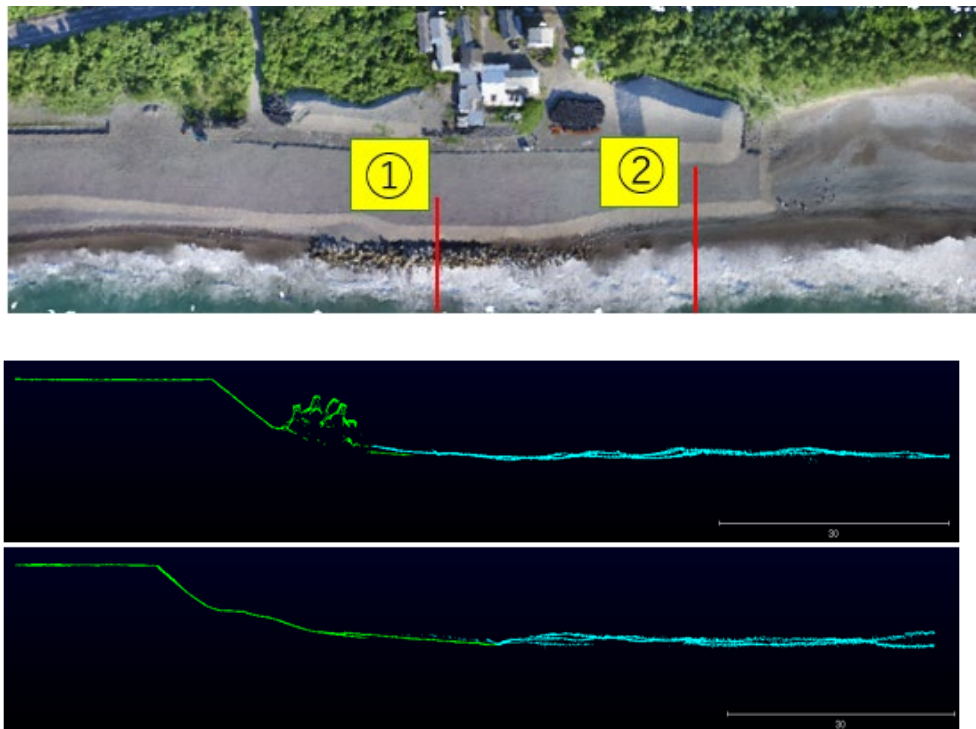


図 5.4-4 1 時期目における断面図と抽出箇所

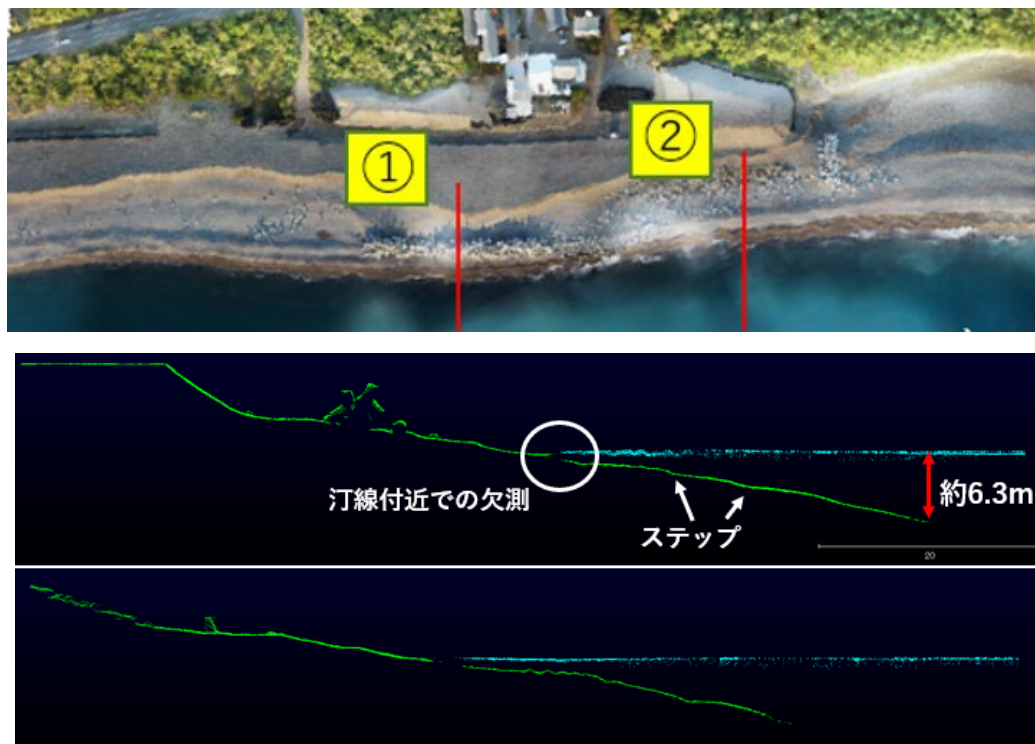


図 5.4-5 2 時期目における断面図と抽出箇所

ドローン測量によって得られた点群データを調整点によって位置調整した後，点群データの編集を行うことが可能なソフトウェアである CloudCompare にて点群の表示・編集を行った．取得したデータにはノイズと呼ばれる解析において不要である点が存在し，それらを SOR(Statistical Outlier Removal)によって除去した．SOR とは統計的な外れ値を除去するフィルタであり，特定の点群の平均距離と点群全体の平均距離の標準偏差に基づいて外れ値を除去する．図 5.4-6 において，取得した点群データ中のノイズとフィルタに用いたパラメータを示す．

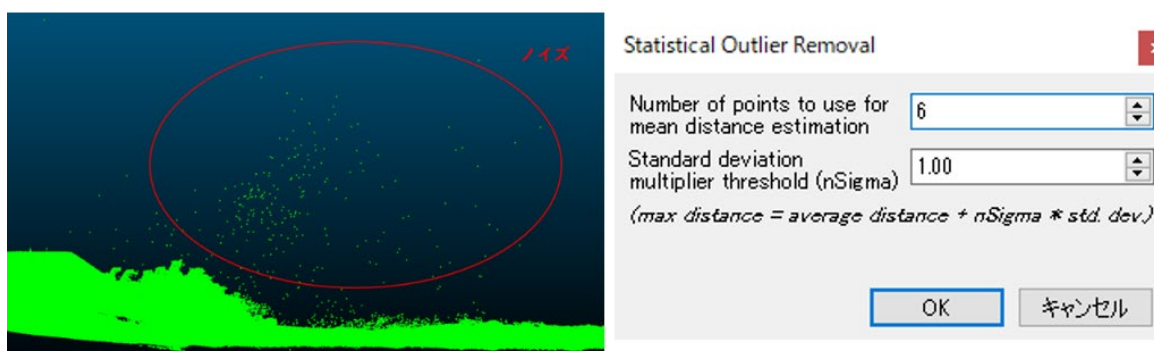


図 5.4-6 ノイズと用いたパラメータ

グリーンレーザスキャナの特長上，取得したデータには海面の点群データも含まれる．しかし，海底や水中の構造物のモニタリングを実施するためには，海面の点群データを除去しなければならない．点群データのフィルタリング方法としては様々なものが挙げられるが，本研究では，CloudCompare における CSF(Cloth Simulation Filter)と手動セグメントによって海面データの除去を行った．図 5.4-7 においてフィルタリングに使用したパラメータを示す．CSF は物理的プロセスのシミュレーションを繰り返すことによって，点群データから地表面のデータであるグラ

ウンドデータと非グラウンドデータに分割するフィルタである。グラウンドデータの抽出の種類には急勾配地形、起伏地形、平坦地形の3つがある。本研究では、海面を平坦なグラウンドデータであると位置づけ、海面データの抽出を行った。フィルタリング後のデータはCloudCompareやReCapにて段彩や陰影などの編集を行い表示・解析を行った。

図5.4-8において、フィルタリング後の海底地形モデルを示す。図より、海岸線から約125m離れた海中に横幅約150m、奥行き約5.4mの潜堤を確認することができる。潜堤とは海岸侵食対策工の1つで、人工リーフと呼ばれることもある没水型の構造物である。次節にて潜堤の点群データを抽出し、3次元データによって状態を把握することが可能であるか確認する。

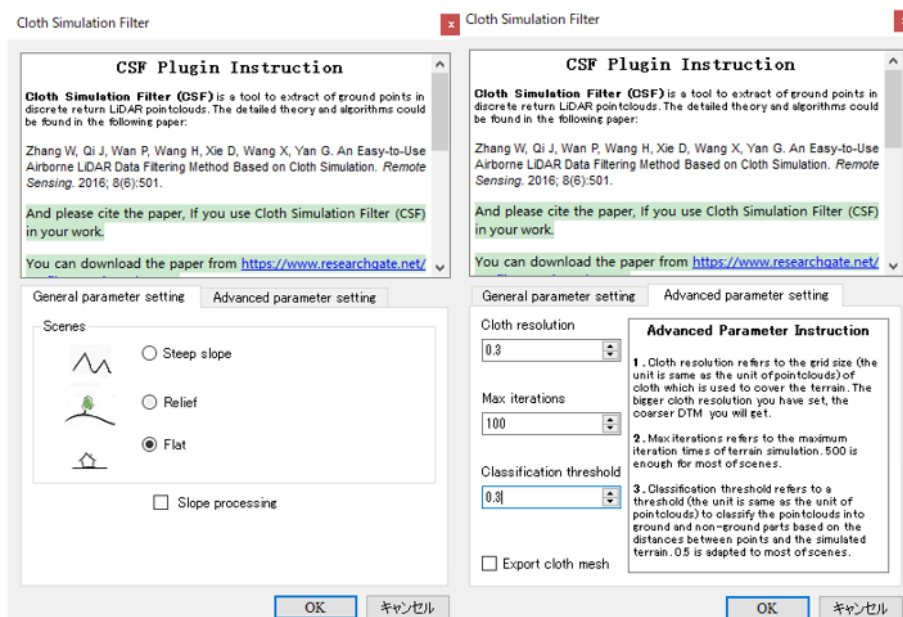


図 5.4-7 海面フィルタリングに用いたパラメータ

作成した3次元モデルから、2時期目の海底の一部と沖合約125m、水深約3mの位置にある潜堤、海岸部の消波ブロックの形状を確認することができた。図5.4-9に潜堤の天端被覆ブロックの点群データを抽出した図を示す。点群データを高度別に色を変えて表示することで、赤く囲んだ部分にて、周囲と比較して約50cmのくぼみがあることが分かった。さらにそのほかの部分でもブロックが一部移動している箇所が見られた。図5.4-10に潜堤の3次元図を示す。このように3次元図では一目でブロックの動きやくぼみを定性的に確認することが可能である。特に天端が海面よりも低い没水型構造物である潜堤は、陸上構造物や離岸堤のように陸上から目視で高さ等を容易に把握できるものではない。従来のモニタリング手法では、浅瀬の広域な構造物の形状を高密度でとらえることは難しく、ドローンを用いることで効率的なモニタリングが期待できると考えられる²⁷⁾²⁸⁾。

また、潜堤は天端上で碎波を生じさせることにより波浪エネルギーを減衰させるメリットを有する一方で、生じた碎波によって平均水位が上昇する。そのため潜堤から開口部へ向かう流れが誘発され、その流れによって潜堤の背後で海底の洗堀が生じるといったデメリットを有している²⁾。特に岸に近いところに潜堤を設置する場合は、洗堀が汀線近傍の地形変化に影響を与える可能性もあるため、ドローン測量によって、構造物だけではなく海底の3次元点群データも同時に取得できれば、潜堤の状態とともに潜堤による海底の洗堀状態も確認でき、海岸侵食に対する総合的なモニタリングが実施できると考える。

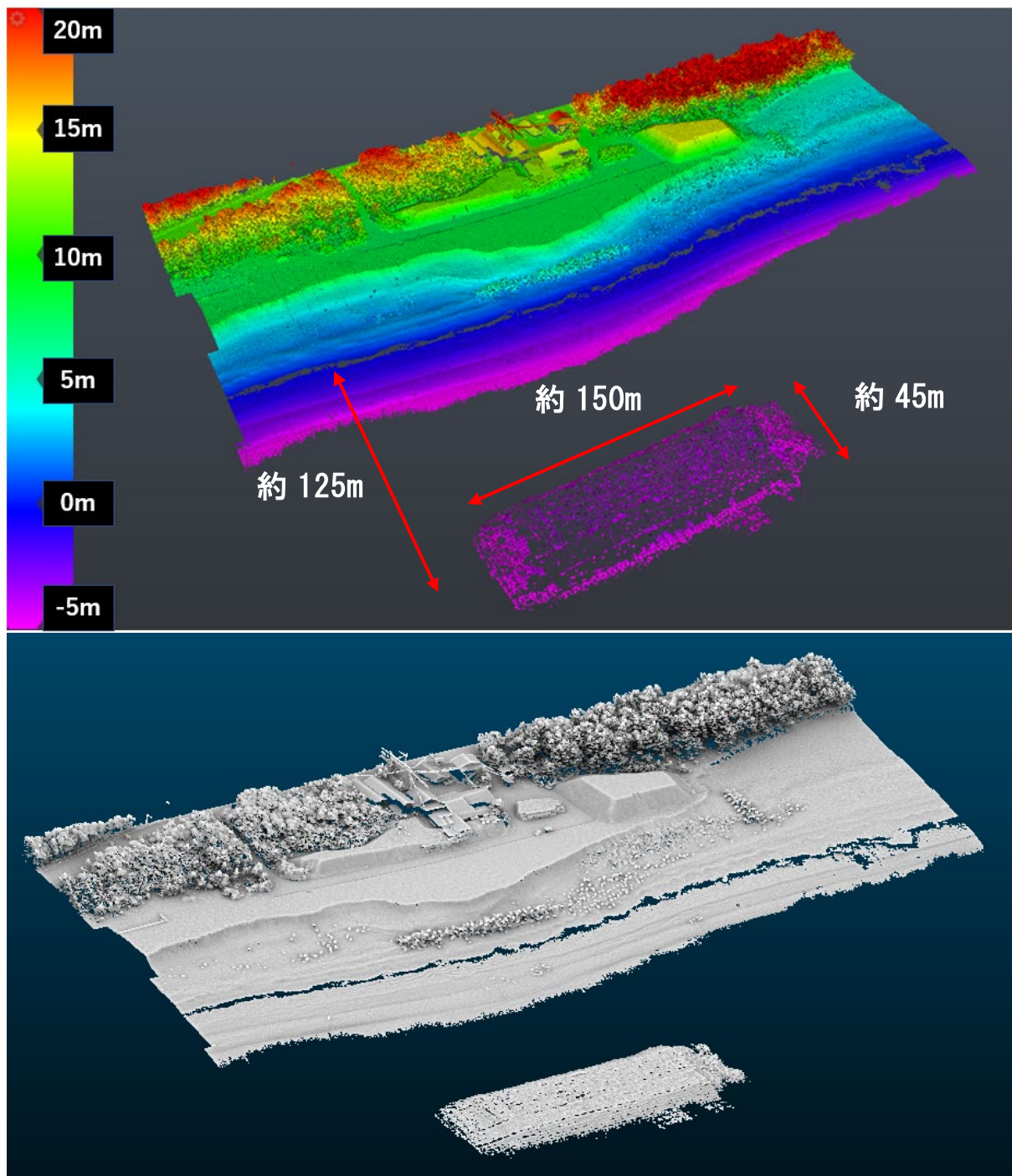


図 5.4-8 上：標高による段彩図(ReCap にて作成) 下：陰影図(CloudCompare にて作成)

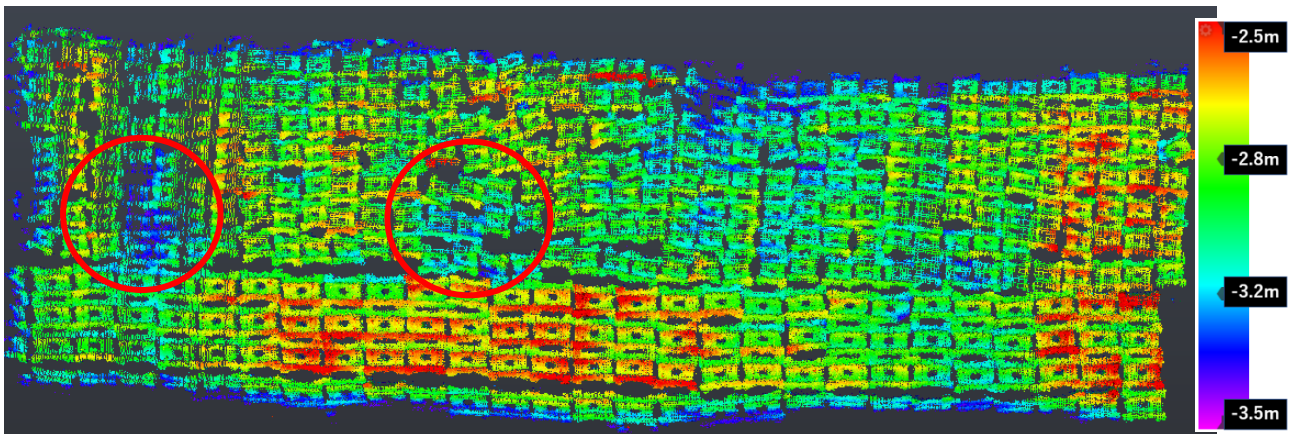


図 5.4-9 潜堤天端ブロック抽出図

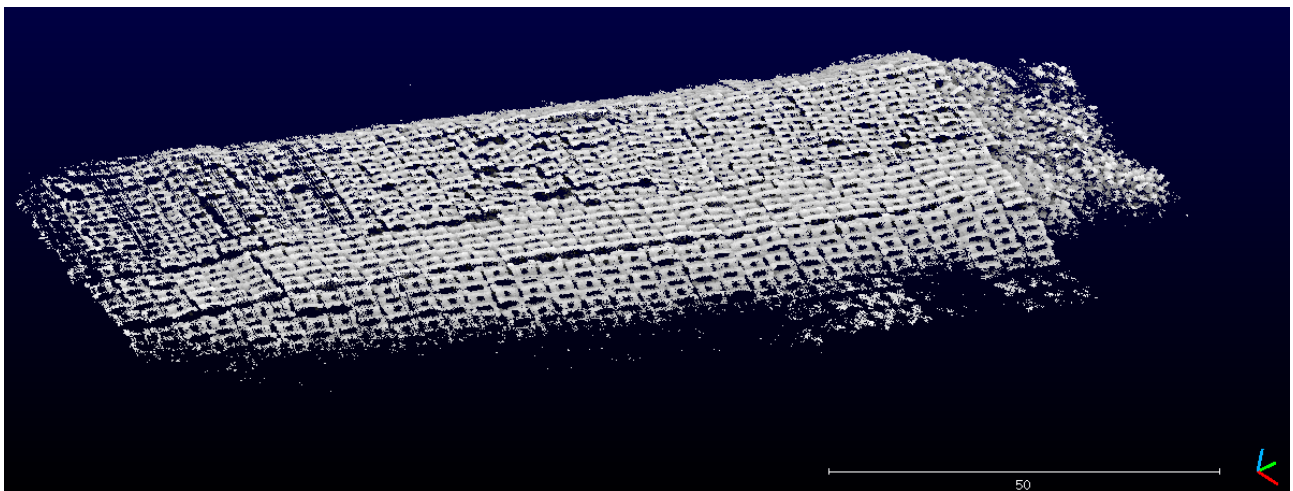


図 5.4-10 潜堤上部の 3 次元図

断面図による検証において汀線付近で欠測が確認されたように、海岸特有の現象である波の発生は測深能力に大きく関係すると考えられる。本検証はドローン測量の測深深度によって取得点密度との関係にどのような傾向がみられるのかを検証した。図 5.4-11 において海底における等高線図を示す。測量によって得られたデータから海底の点群データのみを抽出し、等高線を作成したその等高線を用いて 1m ごとのエリアに分割し、エリアごとに点密度の計算を行った。本検証において水深 0-1m をエリア A, 1-2m をエリア B, 2-3m をエリア C, 3-4m をエリア D, 4-5m をエリア E, 5m-6m をエリア F とする。図 4.5-12 にエリアごとの点群データを示す。水深 6m 以深のデータはわずかに存在したものの、サンプル数の不足によって検証の対象から除外した。また、地上部のデータとして図 4.6-1 中の赤枠で囲んだ部分で同様の検証を行った。点密度の定義は 1m^2 当たりに含まれる点群の個数であり、以下の式(4.5.11)で示される。

$$\text{点密度} = \frac{\text{取得点群数(個)}}{\text{面積}(\text{m}^2)} \quad (4.5.11)$$

本検証においてはエリアごとの面積を計算せず、1 つの点群を中心とする単位面積上にプロットされた点群数をカウントし点密度のデータ値とした。値は各点群ごとに与えられるため、それ

らの値の平均値，最頻値，最大値，最小値を求め，エリアごとに検証を行った．

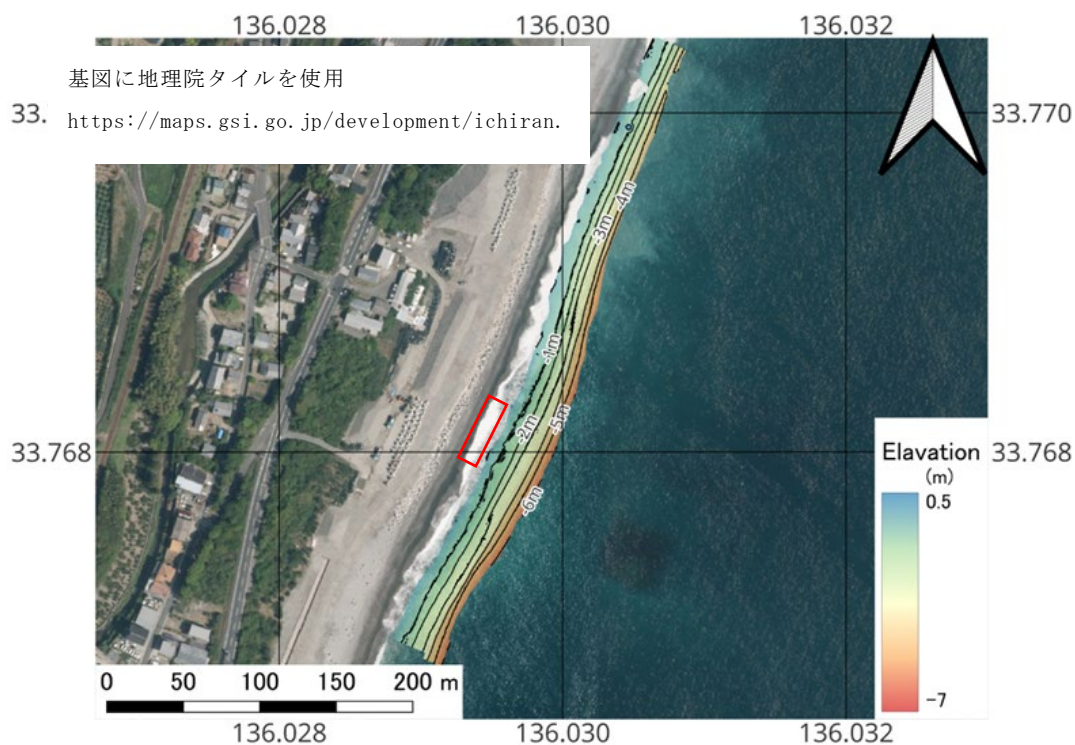


図 5.4-11 エリアごとの点群データ

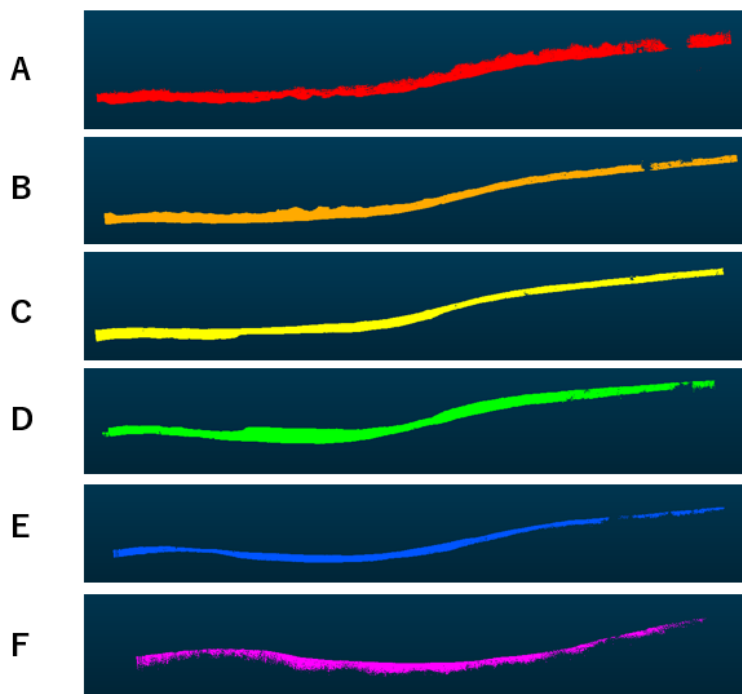


図 5.4-12 エリアごとの点群データ

まず，地上部における点密度計算結果は点群データ数 617,593 個で点密度平均 219.36 個/㎡であった．表 5.4-1 と図 5.4-13 に海底データの点密度計算結果を示す．最大値や最小値から分かるように，全体的なばらつきが大きかったものの，最小値以外のすべての値においてエリア D

の水深 3m-4m で最大となった。平均値が高く、最小値が最も大きいエリア C では最も安定して点群を取得できているといえる。エリア A や B などの水深 2m 以下の範囲では、エリア D と比較して平均値・最頻値が低くなっていることが分かる。一般的には、グリーンレーザは水中部で減衰するため、水深が浅いほど点密度が高くなると考えられるが、本検証においては逆の傾向が見られた。これは沿岸域特有の白波や海底の砂の巻き上げによる水質汚濁が原因であると考えられる。エリア E や F に関しては、水深が深くなることにより、グリーンレーザの減衰によって点密度が低くなったと考えられる。

表 5.4-1 各エリアの点密度計算結果

エリア名	A	B	C	D	E	F
平均値	81.51959	113.0207	172.2026	194.0909	122.7865	61.35358
最頻値	63.344	62.389	105.679	177.299	96.766	46.792
最大値	282.977	340.592	513.116	570.411	412.53	170.296
最小値	0.318	0.637	1.91	0.318	0.318	0.318

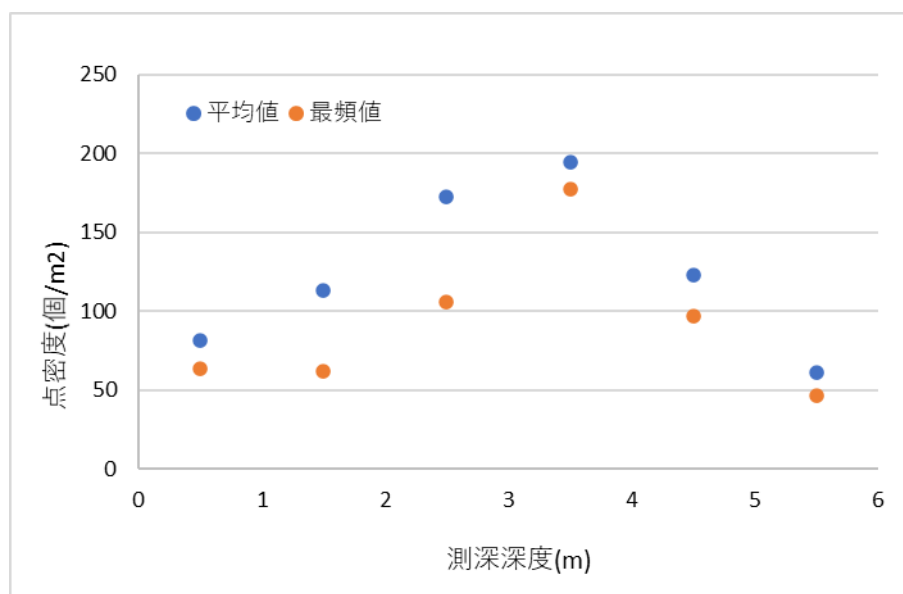


図 5.4-11 平均値と最頻値の散布図

5.5 海岸保全のための施工管理への応用

消波ブロックの沈下や移動によって消波工断面が減少した箇所では、波の抑止能力が低下し、越波や海岸侵食などの災害につながる²⁹⁾³⁰⁾。そのため、日常的な点検や緊急時の点検が行われている。2014年に改正された海岸法では、海岸管理者は、その管理する海岸保全施設を良好な状態に保つように維持し、もつて海岸の防護に支障を及ぼさないように努めなければならないとされた。また、合わせて改正された施行規則では、海岸保全施設の構造等を勘案して、海岸保全施設の巡視及び点検を行うこととされた。海岸保全施設のうち、堤防、護岸、胸壁に関してはその点検方法等を定めたマニュアルが国から示されているが、その他の施設については示されていない。点検診断の方法については、①初回点検診断②日常点検③定期点検診断④臨時点検診断の4種類

に分けられる。初回点検診断では、施設設置などの初期段階において、維持管理の初期状態を把握するために実施している。日常点検では、日常の巡回時に変状の有無や程度を確認するもので、大規模変状の早期発見のために実施する。定期点検診断は、変状の発生及び進行を効率的かつ早期に発見することを目的に行われている。臨時点検診断は地震時や荒天時などの異常時の直後のできるだけ早い段階で行うもので、地震や台風などの過大な外力が作用した後は、突発性の変状が発生・進展する恐れがあり、人命にかかわるような甚大な事故や災害につながる可能性がある。これらの変状の発生・進行の有無を確認し、必要な対策をとるために実施している。図 5.5-1 において消波ブロックの沈下点検状況、実際に損傷したブロックの写真を示す。現在、陸上部の消波ブロックの日常点検や定期点検については、陸上及び海上からの目視により実施されている。消波ブロックの移動、散乱、沈下及び損傷、欠損等の変状について把握することを標準としており、多くの人手によって点検が実施されている。さらに、海中部においてはダイバーによる点検が実施されており、点検診断の効率化や省力化・無人化を図ることが重要である³¹⁾³²⁾³³⁾。

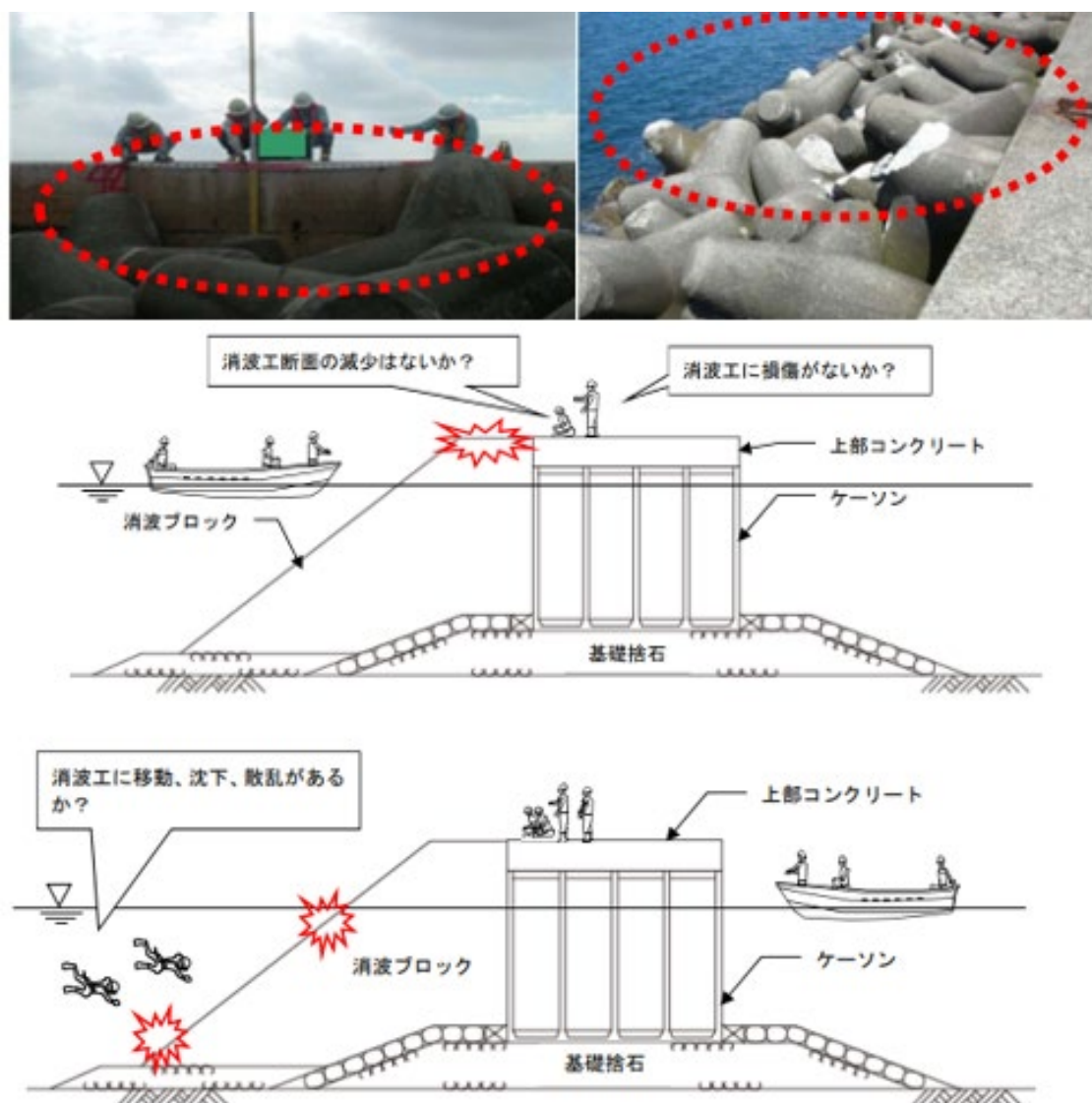


図 5.5-1 現在の点検方法と損傷した消波ブロック
(国土交通省 港湾の施設の点検診断ガイドライン 第2部 実施要項より抜粋)

変状抽出は ICP と呼ばれるアルゴリズムを応用する。ICP とは Iterative Closest Points の略

称で、SLAM 技術を用いたスキャンマッチングのアルゴリズムの 1 つである¹⁴⁾。スキャンマッチングとは、2 つのスキャン(点群)の形状が合致するように位置合わせをする技術のことで、ICP は 2 つのスキャン(現在スキャンと参照スキャン)の間でスキャン点の対応付けと位置の最適化を交互に繰り返すことで点群のマッチングを行う方法である¹³⁾。つまり ICP とは 2 つの点群が整合するように、その位置姿勢の関係を調整する方法の一つである。繰り返し計算に基づいて、段階的に位置姿勢を調整する。

ICP アルゴリズムによる点群マッチングの過程について(5.5.1)～(5.5.3)の順に概説する。ICP は繰り返し計算であるため、その繰り返し数を k で表し k 回目の繰り返しにおいて最適化した位置を x_t^k で表すこととする。

(1) データの対応付け

$k-1$ 回目の繰り返しでの位置 x_t^{k-1} において、スキャン S_t の点とスキャン S_{t-1} の点を対応付ける。まず k 回目の位置 x_t^k が得られたとして、その位置での現在の各スキャン点 p_i^k は次の式で計算される。 R^k は x_t^k の回転ベクトルであり、 t^k は x_t^k の並進ベクトルである。

$$p_i^k = R^k p_i + t^k \quad (5.5.1)$$

次に、 p_i^k から最も近い参照スキャン S_{t-1} の点 q_{ji}^k を次の式で求める。ICP のデータ対応付けの基準は多くの場合、ユークリッド距離を用いる。すなわち、ユークリッド距離が近い点同士を近づけている。 $\text{argmin} = f(x)$ は $f(x)$ を最小にする x を表す関数である。この式から p_i^k からのユークリッド距離が最も小さくなる点を探して q_{ji}^k とする。ここで j_i はスキャン S_t の点番号 i に対応するスキャン S_{t-1} の点番号 j を表す。対応付けの結果は、 S_t と S_{t-1} の各点番号のペアの集合 $C_k = \{(1, j_1), \dots (N, j_N)\}$ で表す。ただし、 N は点の個数である。

$$q_{ji}^k = \text{argmin} \|p_i^k - q_{ji}^k\| \quad (5.5.2)$$

(2) 最適化位置の推定

(1) で求めた対応付けにおいて、コスト関数が最小となる x_t^k を求める。以下の式で各点間の距離の二乗平均を求める。コスト関数とはその入力値がよい値かどうかを評価する関数でコスト関数が最小(極小)となる入力が最も良いと判断されるようにする。ICP におけるコスト関数は位置 x_t^k を入力して、対応付けされた転換の位置誤差の平均を返す関数 $G_1(x_t^k)$ である。つまり、2 つのスキャン間のずれ(各点の位置誤差)が小さいほど尤もらしい位置だと判断する。位置の推定では $G_1(x_t^k)$ が最小となる x_t^k を求める。

$$G_1(x_t^k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|(R^k p_i + t^k) - q_{j1}^{k-1}\|^2 \quad (5.5.3)$$

(3) 繰り返し

位置合わせのスコアが変化しなくなるまで、(1) と (2) を繰り返す。 k 回目の $G_1(x_t^k)$ の最小値と $k-1$ 回目の $G_1(x_t^{k-1})$ の最小値の差が閾値以下になったら繰り返しを終了する。

次に ICP アルゴリズムによる変位量抽出について述べる。図-5.3 に変位量抽出理論の概略図を示す。ICP のアルゴリズムは近傍点に対応付けから最適化を行う過程で、点の移動が回転と平行移動の行列で産出されるため、点の移動をベクトルで表すことができる。このベクトルを応用し、グリーンレーザ搭載ドローンで計測した 2 時期の点群データに対して ICP アルゴリズムを適用すると、2 時期で動いていない点については移動量が算出されないが、動いた点については点の移動を向きと量で算出することができるため、この移動量を変位量とみなすことができる。

点群に対して ICP で変位量抽出を行う際，全点群に対して点群マッチングを行うのではなく，正方形の範囲に区切ったメッシュごとに解析を行う．図 5.5-2 にメッシュサイズを表した図を示す．そして，メッシュ内の点群の移動量と向きの平均値を用いて，変位ベクトルを算出する．このメッシュの大きさをメッシュサイズと定義する．また，メッシュについて点群マッチングを行う際，どの点群までをマッチングの対象とするか決める必要がある．この範囲のことをブロックレンジと定義する．

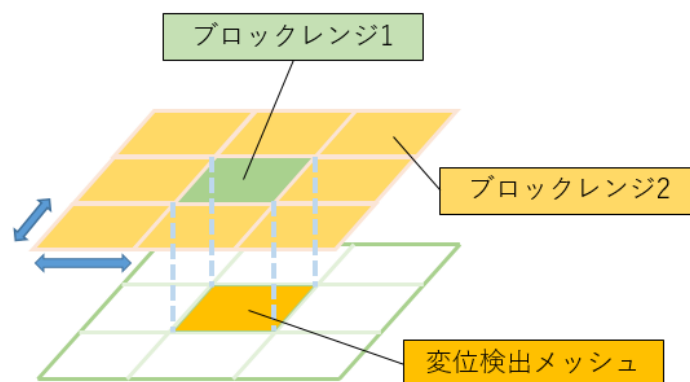


図 5.5-2 ICP 解析におけるブロックレンジ

次に ICP によって抽出される変位量の精度に関しての検証を行う．測量には系統誤差と呼ばれる，測量そのものに一定量の誤差が含まれる．ICP による変位抽出の検証に関しては，点群の座標データよりも 2 時期間の点群データの位置関係が重要となる．測量による系統誤差が最終的に変位として現れないようにするために点群の位置調整を行い，2 時期の測量間である 4 か月の間に変位がないと考えられる面でどの程度の変位が確認されるかを検証した．その値を変位量の許容誤差とし，その値以上の変位が確認された場合は実際に変位しているものとした．図 5.5-3 において，点群の位置調整に用いた点を示す．この図における緑色のデータが 1 時期目，赤色のデータが 2 時期目のデータである．点群調整は測量標準点である調整点を含む 1 時期目 2 時期目それぞれ 5 点ずつ計 10 点を抽出した．表 5.5-1 において点 1～5 の座標を示す．この 10 点は 2 時期間の測量において変動が少ないと思われる，民家の屋根の端やコンクリートブロックの角などを選定し，1 時期目のデータを固定し 2 時期目のデータを移動させ，対応する基準点の距離が最も小さくなるように全点群データを移動させた．本節以降の点群データに関しては，本節で行った 2 時期間の点群調整後の点群データを用いることとする．

位置調整を行った後，2 時期間の測量で変位がないと考えられる面（基準面）と変位を確認するための消波ブロック帯の点群を取り出し，同時に ICP による変位抽出を実施する．基準面には①民家の屋根その 1②民家の屋根その 2③道路の 3 面を抽出した．図 5.5-4～5.5-6 において抽出した面と ICP による変位抽出の結果を示す．検証ではメッシュサイズを 1 として変位を抽出した．結果は①民家の屋根で平均 0.032m，②民家の屋根その 2 で平均 0.049m，③道路で平均 0.049m となった．変位の方法は特に決まった傾向はみられなかったため，系統誤差による点群のずれを取り除くことができたと考える．2 時期間で変位がないと考えられる面の平均的な変位が 0.044m であったことから，本検証では 0.05m 未満を変位の許容誤差とし，0.05m 以上の変位が ICP によって抽出された場合，変位とみなすこととする．

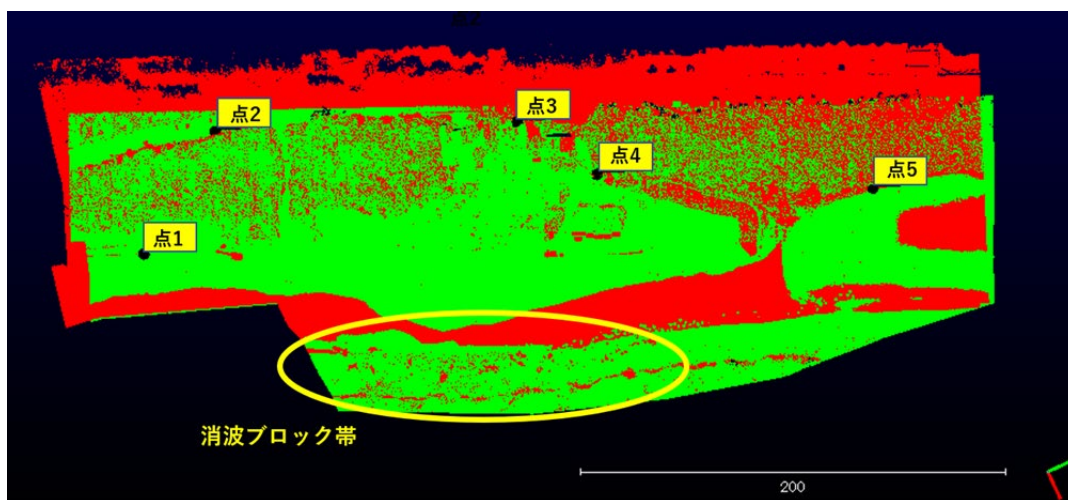


図 5.5-3 点群の位置調整に用いた点

表 5.5-1 調整点の座標

		x	y	z
点1	1時期目	2626.322021	-247659.6875	8.430985
	2時期目	2626.272949	-247659.7344	8.521
点2	1時期目	2579.125977	-247604.4063	11.699386
	1時期目	2579.141113	-247604.4375	11.761999
点3	2時期目	2649.294922	-247459.625	13.685986
	1時期目	2649.333008	-247459.625	13.743999
点4	1時期目	2681.936035	-247451.375	11.686886
	2時期目	2682.00293	-247451.3594	11.780999
点5	1時期目	2743.48291	-247337.9063	5.68
	1時期目	2744.98263	-247337.7287	5.75732

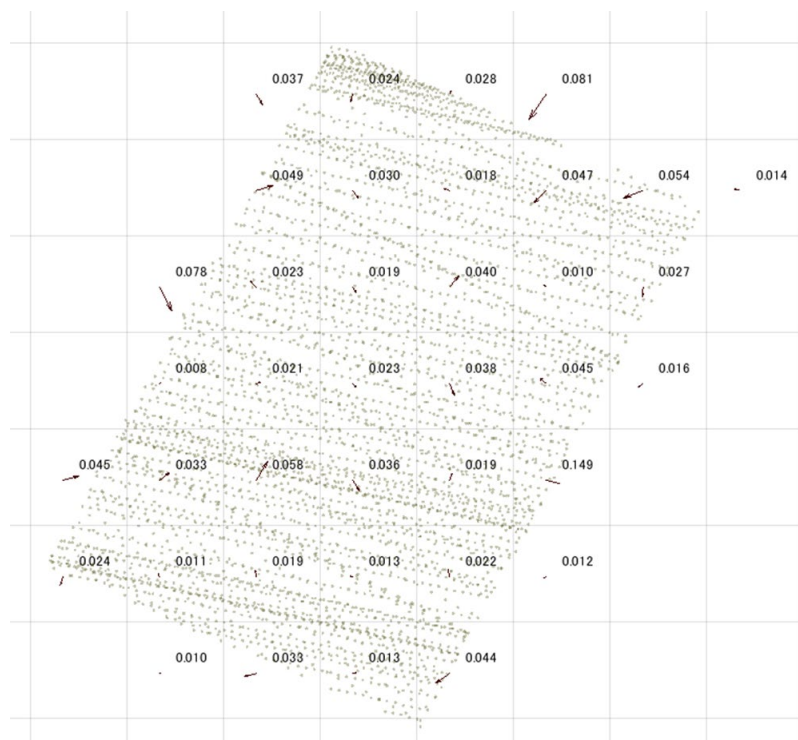


図 5.5-4 民家の屋根の変状例

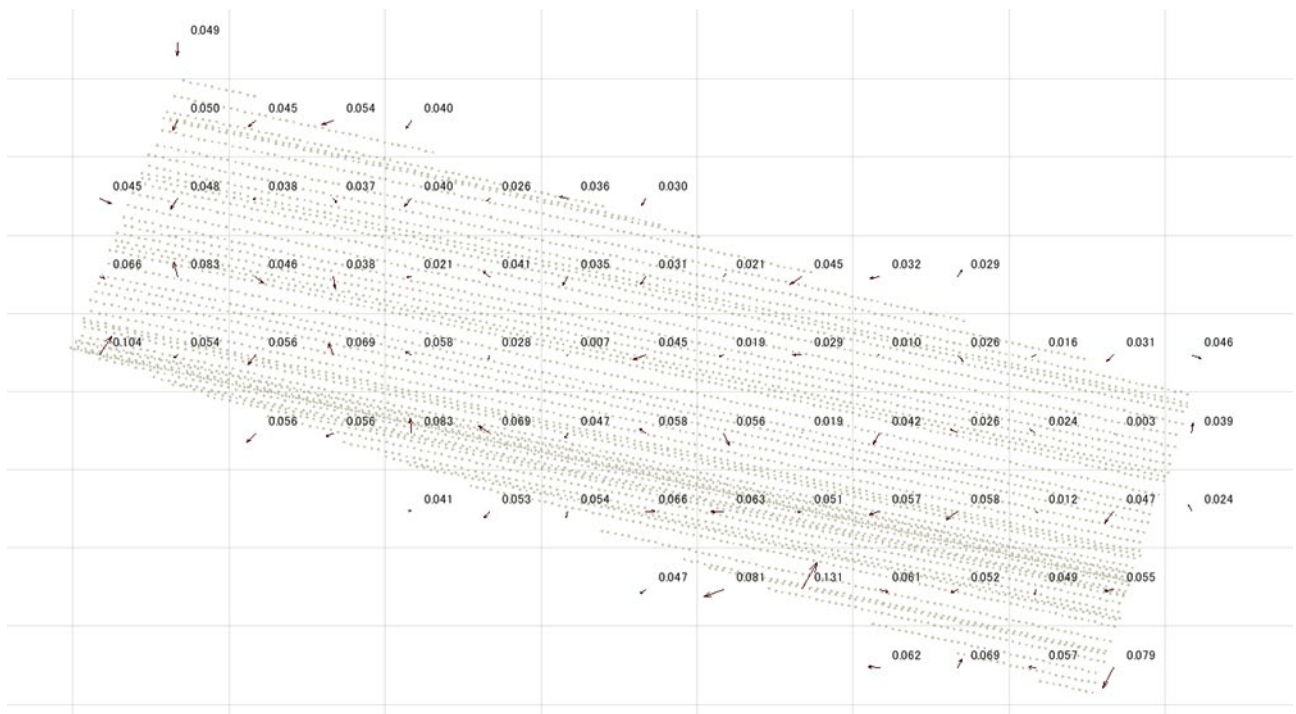


図 5.5-5 民家の屋根の変状例

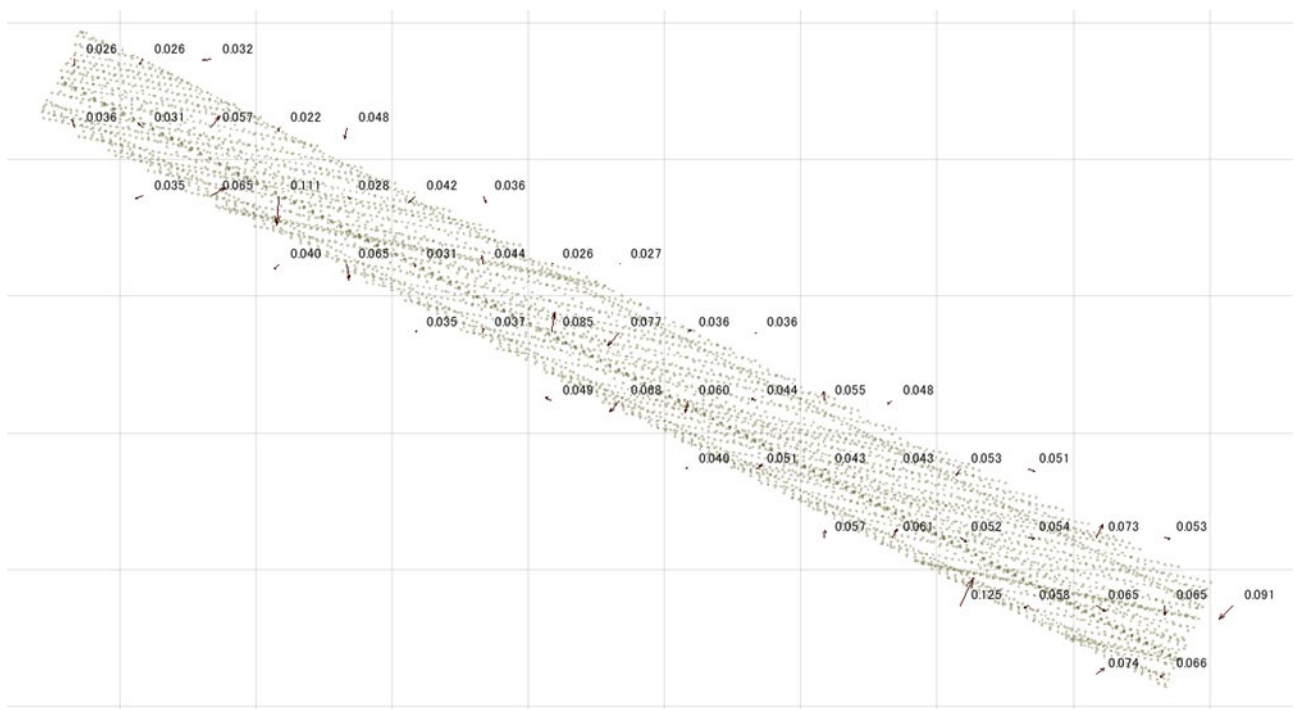


図 5.5-6 道路の変状

図 5.5-7 において海側から見た消波ブロック全体の変状を抽出した図を示す．全体の変状の抽出ではメッシュサイズを 2m とした．結果としてブロック全体の沈下が見られた．変状量はほとんどの場所で差はないものの，図において赤く囲んだ部分のみ，周囲と比べて大きな変状が表れていることが確認できた．さらにこの変状方向のみが大きく斜め右下方方向を指していることから，全体の沈下の一部ではなく，変状を示した周辺のブロックで移動があったと考えられる．図 5.5-8 は消波ブロック帯を横から見た際の変状量であるが，こちらも海側，陸側それぞれ決まった傾

向はみられなかったものの、図 5.5-8 において赤く囲んだ部分の変状のみがきわめて大きく、変状量は 118.3cm であった。変状方向も斜め方向であることが分かる。また、図 5.5-9 は断面抽出図で、図 5.5-10～5.5-14 は消波ブロックの変状の移動量をエリアごとに分割して示したものである。断面抽出図から、概ね正しい変状方向が示されているといえる。

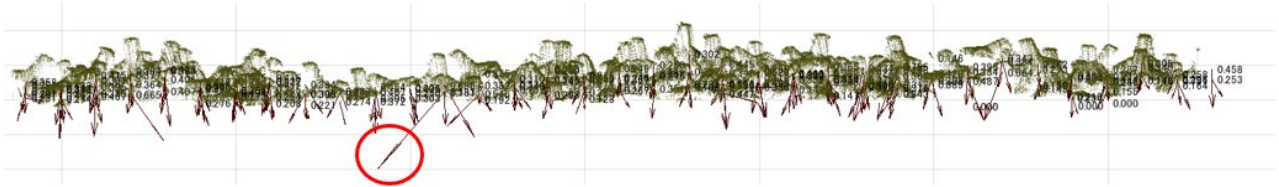


図 5.5-7 全体の変状と大規模変状の位置

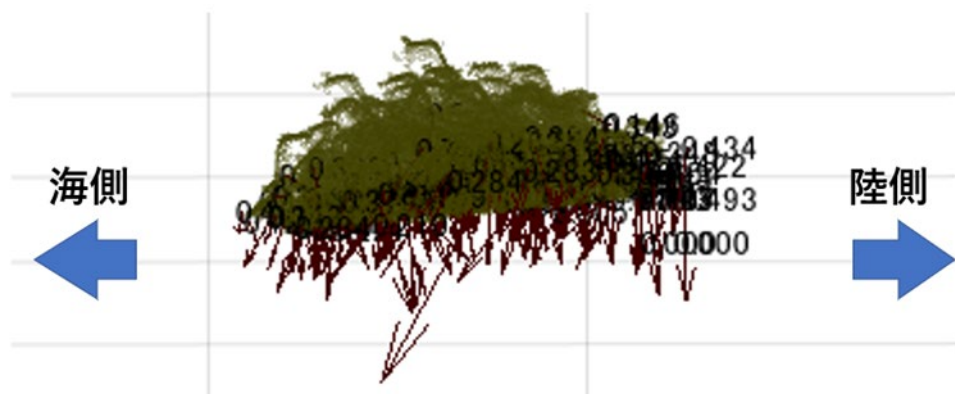


図 5.5-8 横からの変状図

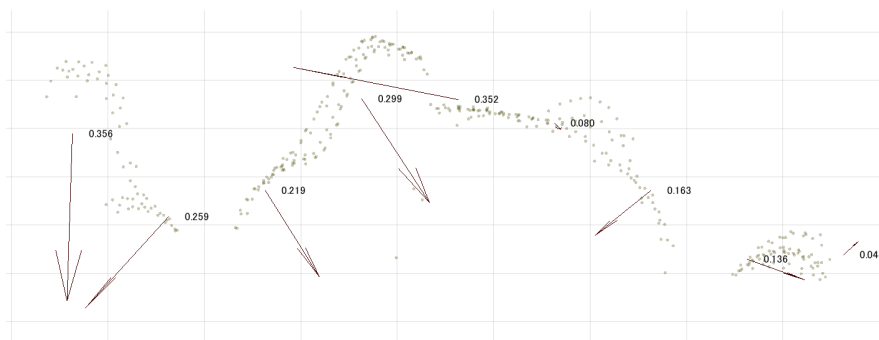
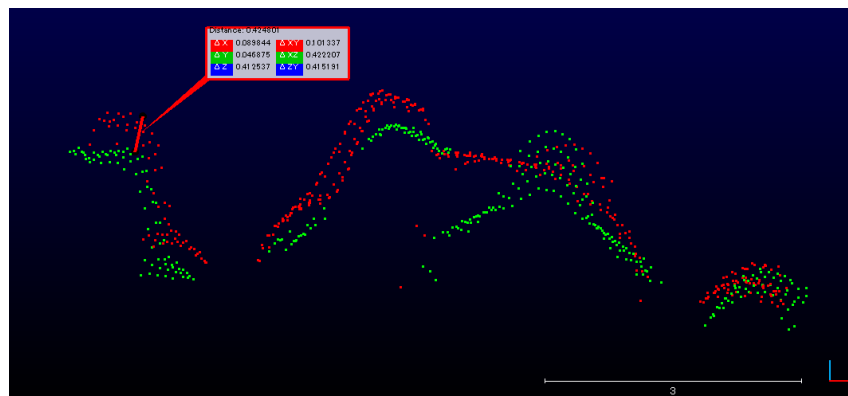


図 5.5-9 2 時期断面の解析結果
(1 時期目：赤の点群，2 時期目：緑の点群)

次に変状の大きさに着目すると、およそ 20cm から 40cm の変状が多く、明らかに外れた値を除く計 158 個のデータで平均値を算出した結果を表-5.2 に示す。結果は全体の変状量が約 33.8cm であることが分かった。七里御浜海岸がある三重県内では 2021 年 8 月と 2021 年 10 月に 1 時間に 120mm を超える記録的大雨が観測されており、どちらも 1 時期目の計測と 2 時期目の計測の間に発生しており、消波ブロックも沈下や移動などの変状が発生している可能性は高いと考える。また、七里御浜海岸のように周辺に基準となる部分がない場合、全体的な沈下を目視によって捉えることは非常に困難である。本現場のように防波堤のような基準面がない場合は陸地からの高さによる判断で沈下を確認するが、周辺も大きく侵食しているため、目視による点検では局所的な移動は確認することができるが全体的な沈下は把握することは不可能であり、ドローン測量による 3 次元での変状量抽出は今後の構造物のモニタリング手法として活用できると考える³⁴⁾。

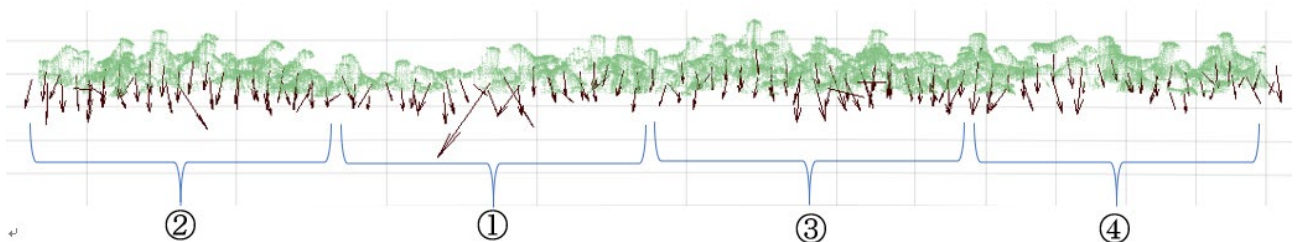


図 5.5-10 消波ブロック帯のエリア分け

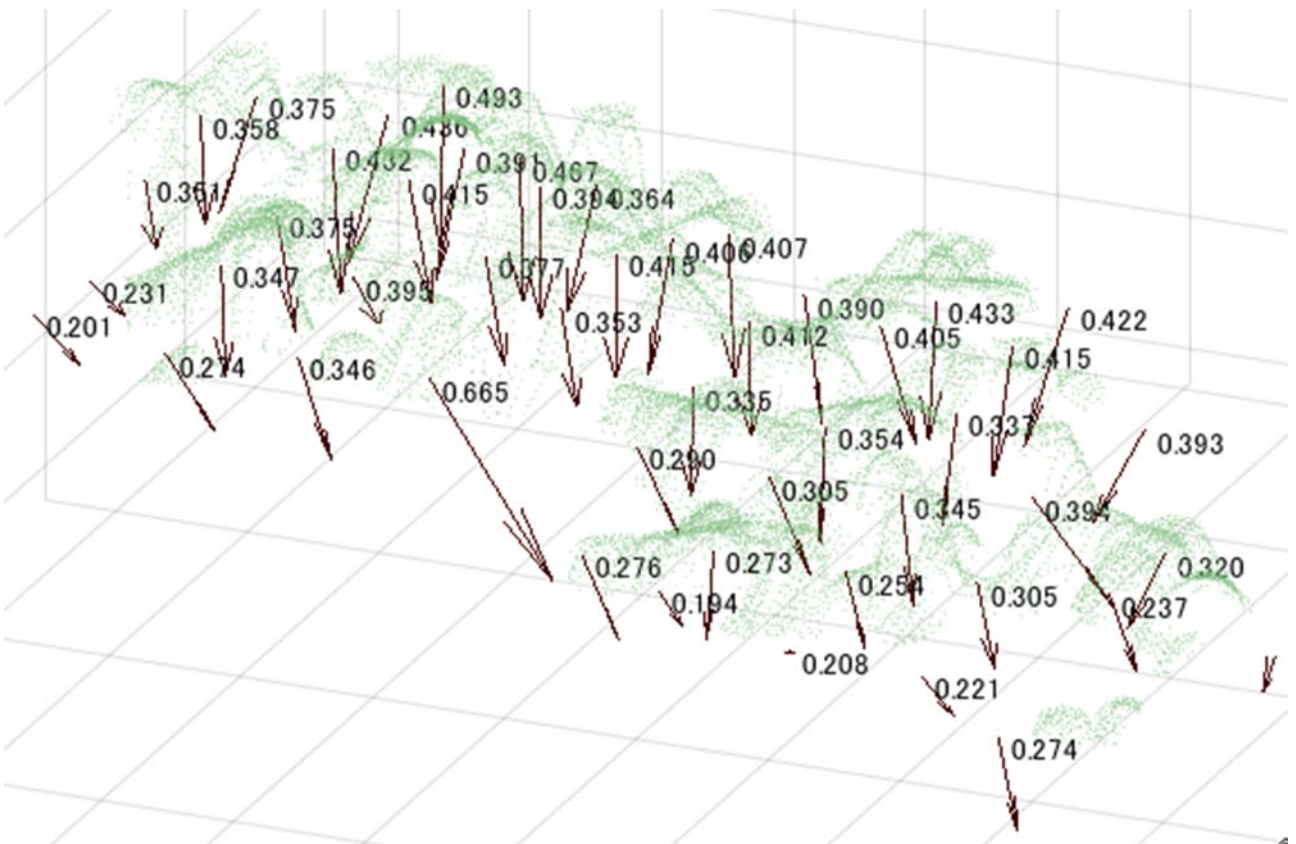


図 5.5-11 ①の変状図

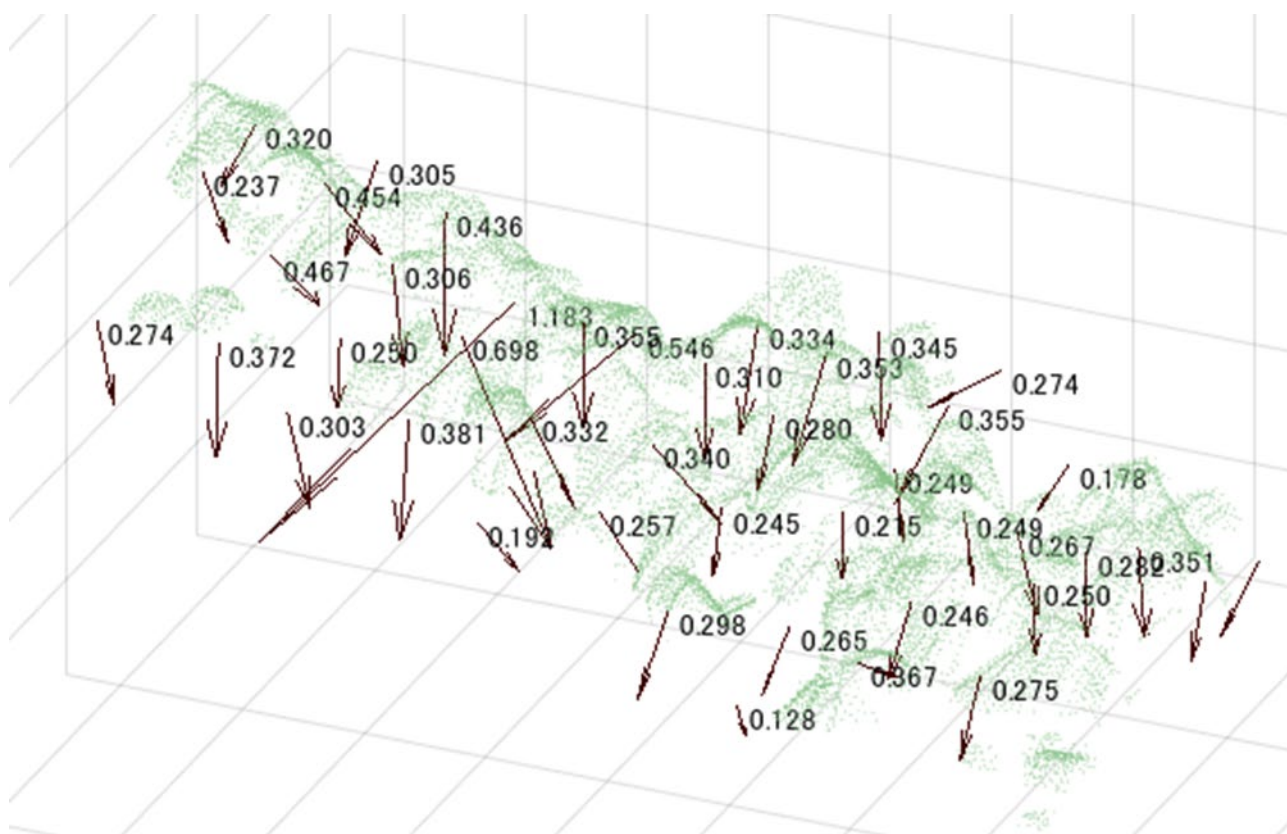


図 5.5-12 ②の変状図

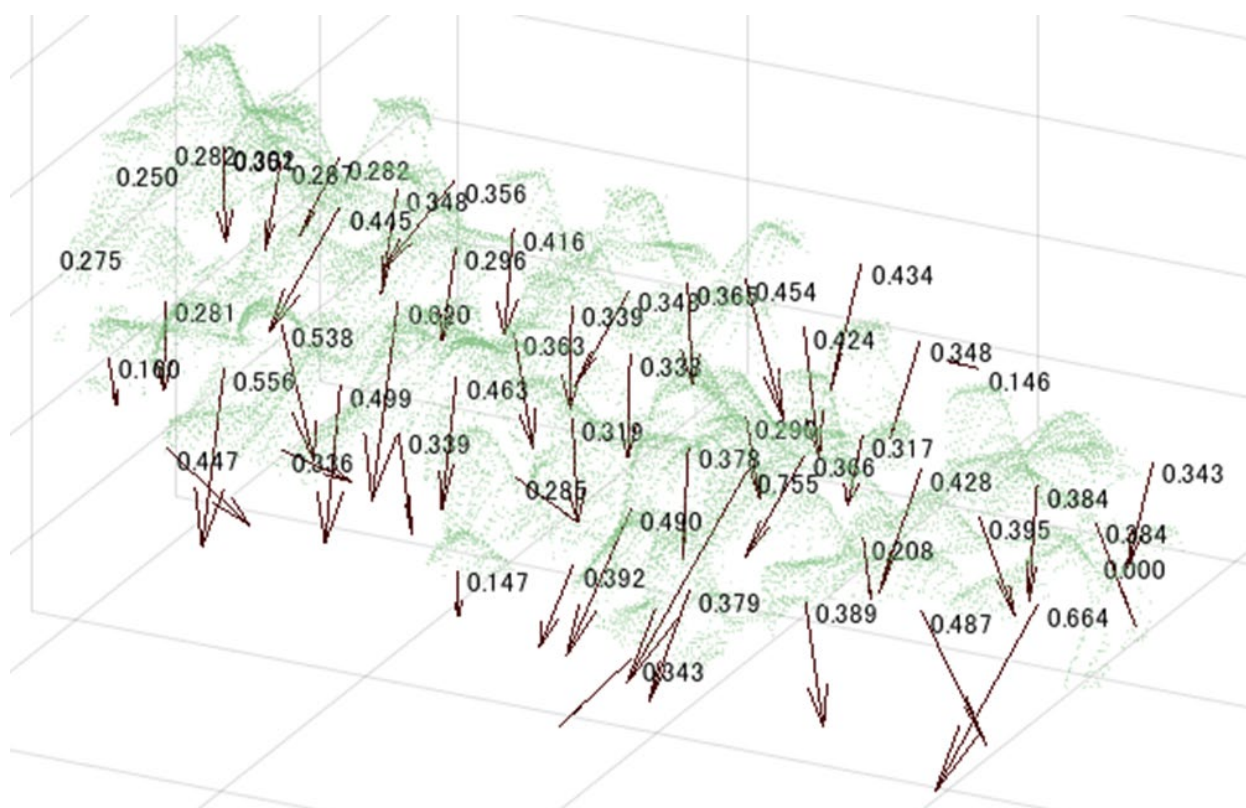


図 5.5-13 ③の変状図

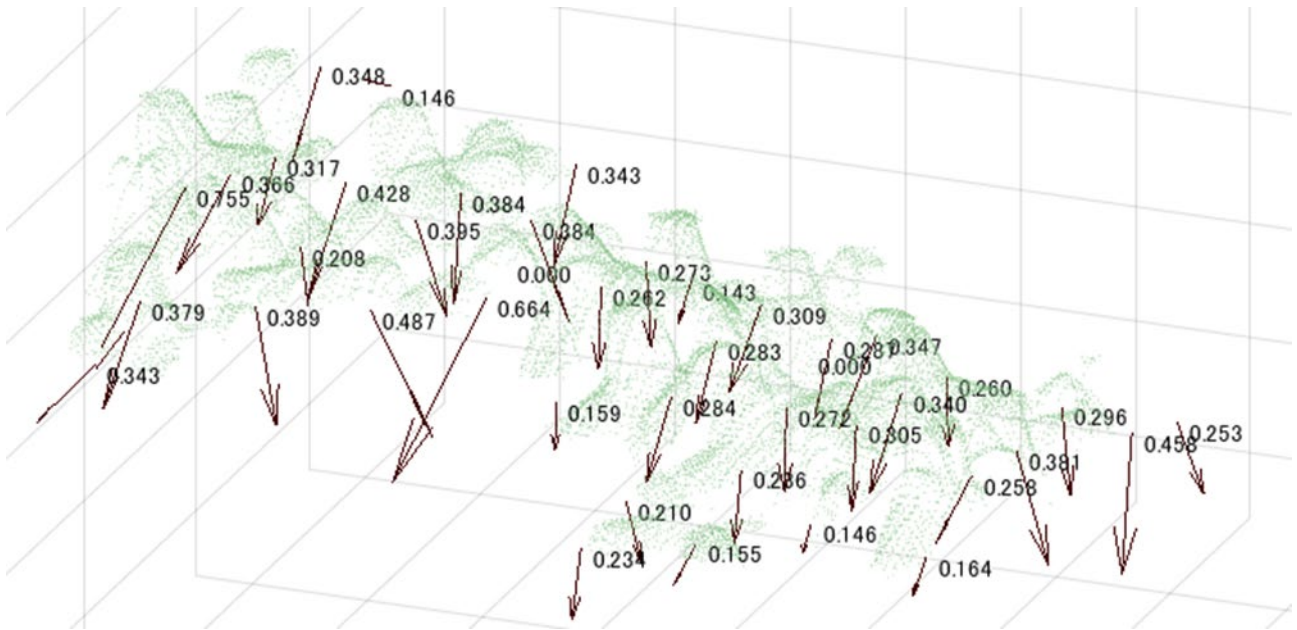


図 5.5-14 ④の変状図

次に、変状が大きく表れた局所的な部分に着目する．図 5.5-15 は消波ブロック変状量に色を付けて示したものであり、先述したように赤枠で囲んだ部分において周辺のブロックと比較して大きく変状していることが分かる．図 5.5-16 は大きな変状が見られた周辺のブロックを抽出したものであるが、赤枠で囲んだブロックのみが大きな変状を示していることが分かる．これは対象のブロックが沈下ではなく移動していることを意味し、ドローン測量と ICP によって移動したブロックを特定することが可能であることが分かった．また、図 5.5-17 は対象のブロックのオルソ画像である．複数の航空写真を重ねて作成されるオルソ画像であるが、2 時期間の変状を確認することができる．

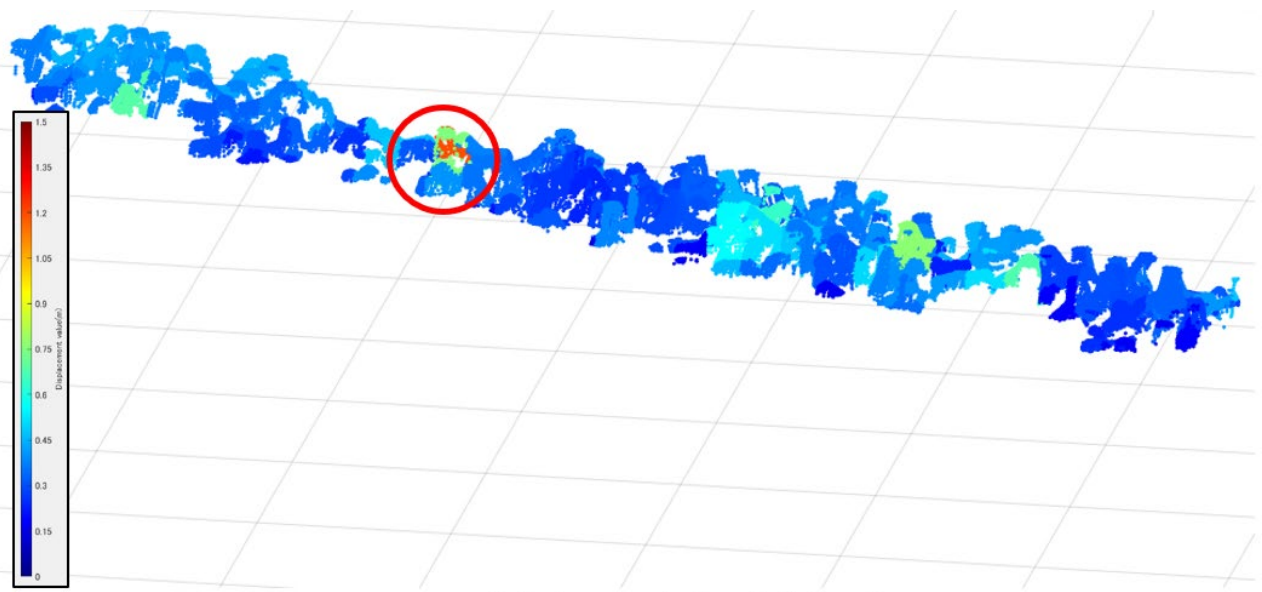


図 5.5-15 消波ブロック全体の変状量段彩図

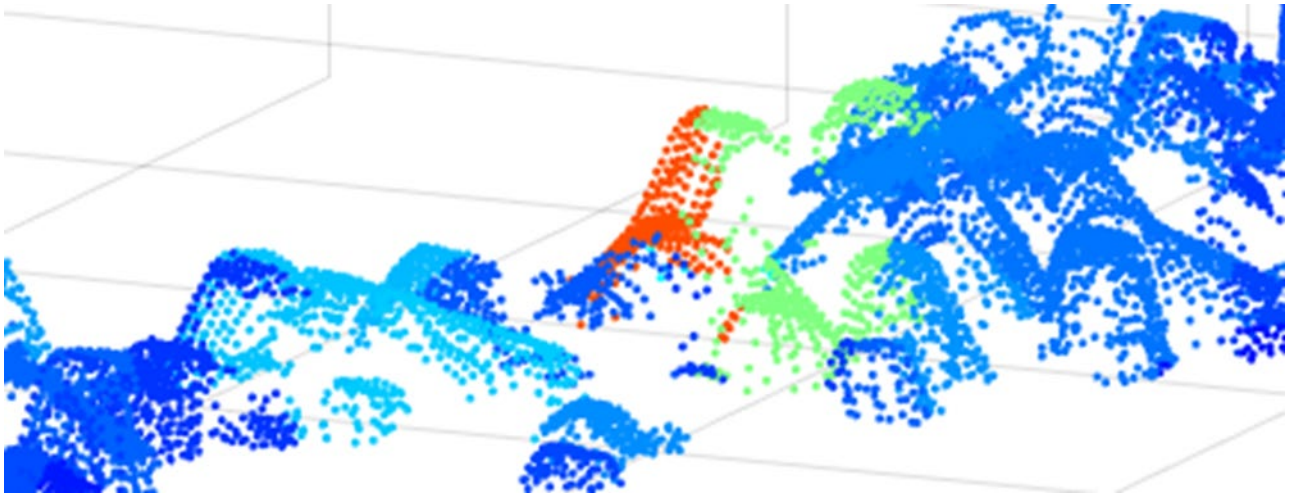


図 5.5-16 大規模な変状が見られたブロックの変状量段彩図

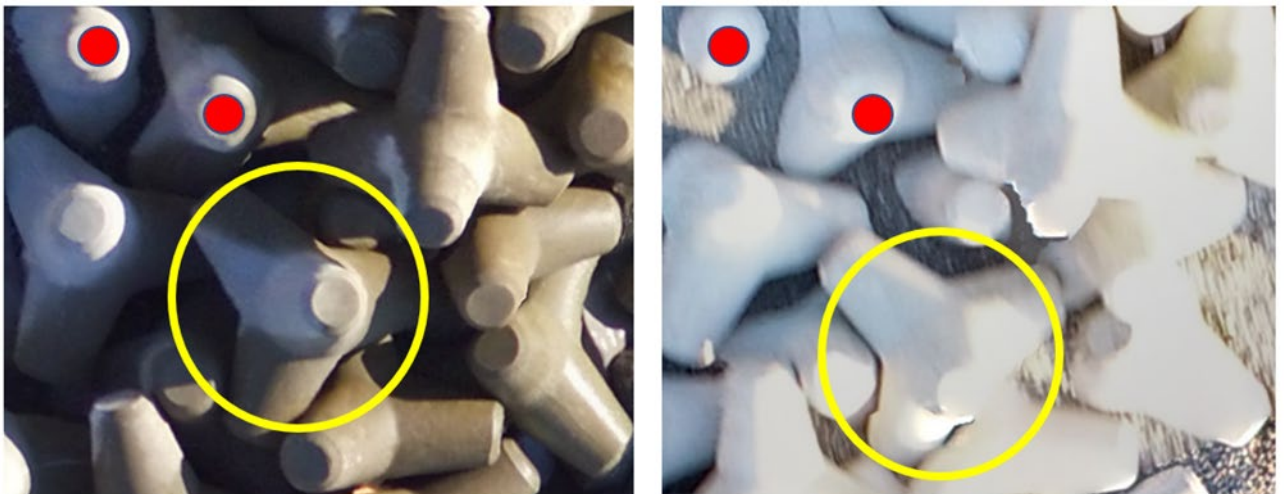


図 5.5-17 移動ブロックのオルソ画像

ICP によって全体的な変状抽出を行った結果から、局所的な移動の可能性がある箇所を特定し、その部分に着目することで、移動したブロックを特定することができると分かった。このことから、大規模な変状の発見を目的とした日常点検や、災害直後の臨時点検診断で消波ブロックを点検する際に、変状のある消波ブロックを特定するためのスクリーニング手法として活用が期待できる。特に災害直後の点検では危険が伴うものであり、今後、水中構造物に対しても適応できれば、本手法の有用性は非常に高いと考えられる。しかし、ICP は点群同士の対応付けによって変状や移動を確認することは可能であるが、複雑な構造をした消波ブロックの損傷があった場合に ICP によって特定できるかは今後検証が必要である。

第6章 結 論

本研究では、水稻直播栽培への均平化への圃場不陸観測の可視化を目的に、グリーンレーザスキャナを搭載した UAV グリーンレーザ測量を行った。UAV グリーンレーザ測量の精度検証について、調整点を用いた検証いずれの時期においても要求精度の較差 ± 5 cmを満たす結果を得ることが出来、その後、検証点を用いた点検でも要求精度を満たすことができた。このことから、調整点がなくても位置制度は良好、調整点の設置の時間・労働力の省力化を可能とし、UAV グリーンレーザ測量の簡易化を実現できる¹⁾²⁾³⁾。

グリーンレーザスキャナによって水面下の形状を標高段彩図として表すことで、各時期の不陸の傾向や具体的な標高の数値をピンポイントで把握することが出来た。特に圃場 B に関して 5 月 15 日と 5 月 28 日の前後で不陸が少なくなったことが分かる。また、これまでの写真測量では水や稲があると地面の形状を把握することは困難だったが、UAV グリーンレーザ測量では、水・稲の両方が混在する圃場でも地面の凹凸を把握することが出来た。水稻農業での UAV グリーンレーザ計測を用いた圃場不陸計測の均平化への有効性について、5 月 15 日と 5 月 28 日の均平作業の前後で圃場 A 及び B において約 5 cm 程度全面で均平化が行うことが出来た。その一方で、局所的に均されていた場所が均平作業を行うことによって以前より不陸が大きくなってしまっている箇所も見受けられた。このように均平化の前後でもピンポイントで圃場をとらえることができるため、より詳細な圃場の管理を可能とする。水稻の直播栽培では、不陸の均平化は苗立ちの安定化を促すという重要な役割を持つため、今後農家の方との連携を含めその原因を探っていく必要がある⁴⁾⁵⁾。

今後の課題として、圃場という比較的浅い水深を持つ現場で、グリーンレーザスキャナがどのような条件でよい結果を得ることが可能か研究を進めていく必要がある。圃場内の水の濁度や水深とグリーンレーザスキャナの関係性を明らかにすることが課題である。また、本研究では一回目が 5 月 15 日、2 回目が 5 月 28 日と一度目の計測から二回目の計測までに約 2 週間の期間が空いている。実際に直播栽培のための均平化の作業は、精密代掻きと 2 回目の代掻きからなる。代掻きは、稲作のもととなる作業であり、この 2 回の代掻き間で UAV グリーンレーザ測量を行いその結果を農家の方に還元し、2 回目の精密代掻きの作業してもらうことで、UAV グリーンレーザ測量が代掻きの前後で有益であったか検証の裏付けと出来るのではないかと考える。そのため、今回の計測では、点密度が 100 点以上/ m^2 と高密度な条件で行い、高密度・高精度な計測は細部の地形まで把握することが出来るが、解析にも時間がかかってしまうため、今後は計測の条件も変化させて最適な計測条件を定めることも課題となる。また、農業従事者が実際に活用するとなれば、このようなレーザを用いた測量は計測から解析まで測量会社に委託することが予想されるため、コストの削減も必要である。UAV による写真測量は一定の費用歩掛けが定められているが、UAV レーザ測量には現時点で今後、グリーンレーザ計測に関する費用とその経営効果を比較していく必要がある⁶⁾⁷⁾。

本研究では、ドローン測量を沿岸域における新たなモニタリング手法として活用するために、ドローン測量により沿岸域の 3 次元点群データを取得し、そのデータから基本特性の検証と ICP による 2 時期の変状量を抽出した。その結果とそれらから得られた知見、そして、今後の課題を以下に示す⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。

- 1) 断面図による解析からは、最大 6.3m の点群を取得できることが確認され、ステップなどの海岸地形を取得することができた。また、汀線付近ではどの地点でも欠測が見られた。
- 2) 測深深度と点密度の検証では、取得点密度は 3m~4m の範囲で最大となり、それよりも浅い範囲や深い範囲では点密度が下がる傾向が見られた。
- 3) 3 次元モデルによる検証からは、潜堤の 50cm のくぼんだ部分やブロックの移動を確認で

きた。

4) ICP を用いた消波ブロックの変状抽出では、消波ブロック全体の沈下と局所的な約 118cm のブロックの移動を抽出することができた。

本研究で得られた結果から、ドローン測量は目視で捉えることが困難である構造物全体の変状や異常箇所を特定するためのスクリーニング手法として点検診断への活用が期待できるといえる。1)2)における浅瀬での欠測や点密度の低下は沿岸特有の白波の発生や、波による海底の砂の巻き上げによる水中の透明度の低下が原因であると考ええる。しかし、本研究ではそれらの検証が行えていないことから、今後どのような条件であれば点群取得が可能であるのかを検証する必要があると考える。また、ICP による変状抽出では、正確な変状の真値が分かった条件での ICP による変状抽出等によって、沿岸域における変状抽出量の精度検証を行う必要がある。また、本研究では、海中の構造物に対して検証を行えていない。今後、ICP を海中の構造物に応用させることで、沿岸域における様々な構造物のモニタリングに活用することができると考える。

参考文献

第 1 章

- 1) 農林水産省：令和 2 年度 食料・農業・農村白書，pp. 1-3, 8-11, pp. 129-133, pp. 138-142, pp. 151-156, pp. 27-215, pp. 236-239, 2021. 5
- 2) 農林水産省：スマート農業実証プロジェクト, 2019
- 3) 農林水産省：最新の直播栽培の現状, 2019
- 4) 農林水産省 生産局 農産振興課：水稻直播栽培の現状について, 2008. 3
- 5) 国土交通省 水管理・国土保全局：水害レポート, pp. 5-6, 2023.
- 6) 富井隆春：陸上・水中レーザードローン：革新的河川管理プロジェクトの成果：グリーンレーザードローン測量技術（特集 河川工事），pp. 53-58, 日本建設機械施工協会誌, Vol. 72, No. 8, 2020.
- 7) 堺 浩一，間野 耕司，橘 菊生，西山 哲：UAV グリーンレーザ計測による河川構造物点検への適用検討，土木学会河川技術論文集, Vol. 27, pp. 51-56, 2021.

第 2 章

- 1) 農林水産省：米をめぐる関係資料，pp. 3-6, pp. 10-17, pp. 30-31, pp. 59-60, 2020. 7
- 2) 農林水産省：稲作の現状とその課題について，pp. 1-21, 2017. 3
- 3) 農林水産省：スマート農業の展開について，pp. 2-40, 2021. 5
- 4) 農林水産省：令和 3 年度スマート農業実証プロジェクト（ローカル 5G）について，2021. 6
- 5) 井上吉雄，横山正樹：ドローンリモートセンシングによる作物・農地診断情報計測とそのスマート農業への応用，Journal of the Remote Sensing Society of Japan, Vol. 3 No. 3, pp. 224-235, 2017
- 6) 水稻直播研究会：水稻湛水直播栽培の手引き，pp. 1-16, 2012. 12
- 7) 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 東北農業研究センター：乾田直播栽培技術マニュアル ver. 3. 1, pp. 1-35, 2019
- 8) 石塚直樹，岩崎亘典，坂本利弘：マルチコプタ型 UAV による熊本地震被災水田の不陸計測と不陸発生の素因究明，システム農学（J. JASS），34（2），pp. 41-47, 2018
- 9) 矢治幸夫，木村勝一，元林浩太：ほ場均平作業の新技術，農業機械学会誌 第 59 号 第 3 号, pp. 129-132, 1997
- 10) 農研機構 農業環境変動研究センター：ドローンを用いたほ場計測マニュアル（不陸（凹凸）編），2018
- 11) 国土交通省：ICT の全面的な活用（ICT 土工）について，pp. 1-43, 2016. 6
- 12) 渡辺克司：ICT 農業，スマート農業への現状と課題（1），情報処理センター研究年報 No. 22, 2017. 3
- 13) 渡辺克司：ICT 農業，スマート農業への現状と課題（2），情報処理センター研究年報 No. 23, 2018. 3
- 14) 農林水産省生産局技術普及課：農業分野におけるドローンの活用状況，pp. 1-25, 2020. 6
- 15) 農林水産省：農業用ドローンの普及にむけて（農業用ドローン普及計画），pp. 1-20, 2019. 3
- 16) 農林水産省：農業分野における ICT 等の先進技術の活用の推進，2017. 6
- 17) 堺浩一，間野耕司，橘菊生，西山哲：グリーンレーザドローンの計測精度と計測特性の把握に関する研究，応用測量論文集 第 31 巻, pp. 99-110, 2020
- 18) 堺浩一，間野耕司，橘菊生，西山哲：UAV グリーンレーザ計測による河川構造物点検への適用検討，河川技術論文集，第 27 巻, 2021. 6
- 19) 間野耕司，堺浩一：グリーンレーザドローンの紹介，「写真測量とリモートセンシング」, Vol. 58, NO. 4, 2019
- 20) 国土地理院：UAV 搭載型レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル，2019

第3章

- 1) 砂浜保全に関する現状と課題 国土交通省 (参照 P. 8)
- 2) http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/tsunamiKondankai/dai01kai/pdf
- 3) 沿岸部 (海岸) における気候変動の影響及び適応の方向性 国土交通省 (参照 P. 5)
- 4) <http://www.mlit.go.jp/common/001115596.pdf>
- 5) 海岸侵食対策 八千代エンジニアリング株式会社
http://www.yachiyo-eng.co.jp/service/rivereng/rfd_06.html
- 6) 吉田圭介・前野詩朗・間野耕司・山口華穂・赤穂良輔: ALB を用いた河道地形計測の精度検証と流況解析の改善効果の検討, 水工学, 第 73 巻 4 号, p3-6, 2017
- 7) 小澤淳真・岡部貴之・川村裕・宮作尚宏・橘菊生: 航空レーザ測深技術, 写真測量とリモートセンシング, 第 56 巻 6 号, p290-291, 2017
- 8) マルチビーム深浅測量 沿岸海洋調査株式会社 <http://www.engan.jp/chikei/multibeam.html>
- 9) 用語一覧集「パンクロマチック画像」株式会社パスコ
<https://www.pasco.co.jp/recommend/word/word101/>
- 10) 中川雅史(2015)『絵でわかる地図と測量』 講談社 第2章
- 11) センサを利用した観測方法 JAXA 第一宇宙技術部門
https://www.eorc.jaxa.jp/rs_knowledge/mecha_howto.html

第4章

- 1) 農林水産省 農林水産技術会期事務局: 農業分野におけるオープン API の整備に向けて, 2020. 8
- 2) 農林水産省 生産局技術普及課: 農業分野におけるドローンの現状と今後の展望, 2019
- 3) 野口伸: 最新農業の基礎からドローン技術習得, 作業記録と生産管理, 新規参入まで図解でよくわかるスマート農業の基本, 株式会社誠文堂新光社, 2020
- 4) 野口伸: ICT 農業とリモートセンシング, 日本ロボット学会誌, Vol. 34 No. 2, pp. 100-102, 2016
- 5) 神成淳司: スマート農業 自動走行, ロボット技術, ICT・AI の利活用からデータ連携まで, 株式会社 NTS, 2019
- 6) 片桐哲也, 岡本詩乃: スマート農業に向けたリモートセンシングシステムの開発, KONIKA MINOLTA TECHNOLOGY REPORT VOL. 15, 2018
- 7) 農研機構: 農業におけるリモートセンシング・GIS・地理空間情報の活用, 2019
- 8) 井上吉雄: 高解像度光学衛星センサによる植物・土壌情報計測とスマート農業への応用, Journal of the Remote Sensing of Japan, Vol. 37 No. 3, pp213-223, 2017
- 9) 井上吉雄: 農業のスマート化に向けた先進リモートセンシングと空間情報技術, 第9回横幹連合カンファレンス, 電気通信大学, 2018. 10
- 10) 独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構 近畿中国四国農業研究センター: 鉄コーティング湛水直播マニュアル, pp. 1-12, pp. 15, 2010
- 11) 国土地理院 基本図情報部: 測量への無人航空機 (UAV) の導入に向けた検討状況について, pp. 3-30, 2016. 2
- 12) 室伏春樹, Chong Nak-Young: スマート農業におけるドローンの活用の現状と課題, 情報処理学会研究報告, Vol. 2017-CE140 No. 3
- 13) 田村博, 漆原充, 大高靖弘, 白井康裕: ドローンを活用した新たな航空レーザー測量の開発と展開, 静岡理工科大学紀要, Vol. 27, pp. 41-47, 2019
- 14) Denis Pastory Rubanga, Katumori Hatanaka, Sawahiko Shimada: Development of a Simplified Smart Agriculture System for Small-scale Greenhouse Farming, Sensors and Materials, Vol. 31, No. 3 (2019) 831-843 831
- 15) 後藤誠二郎, 栗屋善雄: RapidEye 衛星の Rededge バンドを用いた森林タイプ分類の精度向上に関する

- る検討—岐阜県御嵩町を例として—, システム農学 (J. JASS), 29 (4), pp. 145-153, 2013
- 16) 亀井卓也, 伊藤那智, 菅井慎也, 太田諭志, 佐鳥新, 千葉一永: 精密農業高度化のための小型無人航空機を用いた正規化植生指数マップ作成, 航空宇宙技術, Vol.12, pp. 111-117, 2017
 - 17) 濱侃, 田中圭, 望月篤, 鶴岡康夫, 近藤昭彦: UAV リモートセンシングおよび登熟期かの気象データに基づく玄米タンパク含有率推定, Journal of the Remote Sensing Society of Japan, Vol.38 No. 1, pp. 35-43, 2018
 - 18) 矢治幸夫, 木村勝一, 元林浩太: ほ場均平作業の新技術, 農業機械学会誌第 59 巻 第 3 号, 1997
 - 19) 南部雄二: ほ場 (耕作地) における整地均平作業の効率化, 電気設備学会誌, Vol. 37 No. 10, pp. 724-727, 2017. 10
 - 20) 千葉豪: フランスの圃場整備 (報文), 農業土木学会誌 第 54 巻 第 2 号, pp. 11-16, 1986
 - 21) 瀬下隆, 伊藤淳士, 澁谷幸憲, 西脇健太郎: UAV リモセンの農業への活用研究, 「写真測量とリモートセンシング」, Vol. 55 No. 1, 2016
 - 22) 竹内晴信, 関口建二, 北川巖, 竹中秀行: 水稻湛水直播栽培におけるレーザ均平機を用いた圃場均平化の必要性, 北海道立農試集報 83, pp. 55-58, 2002
 - 23) 長利洋: 水田の均平状態の評価法に関する研究, 農業工学研究所報告 第 42 号, pp. 1-62, 2003
 - 24) 倉岡孝幸, 村川雅紀, 兼子健夫: 調査から作業まで 1 人で可能な田面均平化技術, 熊本県農業研究センター研究報告, 第 13 号, pp. 40-45, 2005
 - 25) 野波健蔵: 世界のドローン開発動向と農業応用からみた課題と展望, 計測と制御 第 55 巻 第 9 号, 2016. 9
 - 26) 国土交通省: 測量・設計に関する説明資料, 2016. 6
 - 27) 北内宏明, 西山哲, 崎田晃基, 堺浩一: 圃場不陸計測への UAV グリーンレーザ測量技術の適用, 土木情報学会, 2020
 - 28) 北内宏明, 西山哲, 崎田晃基, 堺浩一: 圃場の不陸調査における UAV グリーンレーザ計測の活用, 第 72 回土木学会中国支部研究発表会, pp. 407-408, 2020
 - 29) 農林水産省 農林水産技術会期事務局: 農業分野におけるオープン API の整備に向けて, 2020. 8
 - 30) 農林水産省 生産局技術普及課: 農業分野におけるドローンの現状と今後の展望, 2019
 - 31) 野口伸: 最新農業の基礎からドローン技術習得, 作業記録と生産管理, 新規参入まで図解でよくわかるスマート農業の基本, 株式会社誠文堂新光社, 2020
 - 32) 野口伸: ICT 農業とリモートセンシング, 日本ロボット学会誌, Vol. 34 No. 2, pp. 100-102, 2016
 - 33) 神成淳司: スマート農業 自動走行, ロボット技術, ICT・AI の利活用からデータ連携まで, 株式会社 NTS, 2019
 - 34) 片桐哲也, 岡本詩乃: スマート農業に向けたリモートセンシングシステムの開発, KONIKA MINOLTA TECJNOLOGY REPORT VOL. 15, 2018

第 5 章

- 1) 国土交通省 水管理・国土保全局: 水害レポート, pp. 5-6, 2023.
- 2) 富井隆春: 陸上・水中レーザードローン: 革新的河川管理プロジェクトの成果: グリーンレーザードローン測量技術 (特集 河川工事), pp. 53-58, 日本建設機械施工協会誌, Vol. 72, No. 8, 2020.
- 3) 堺 浩一, 間野 耕司, 橘 菊生, 西山 哲: UAV グリーンレーザ計測による河川構造物点検への適用検討, 土木学会河川技術論文集, Vol. 27, pp. 51-56, 2021.
- 4) 富田 紀子, 西山 哲, 間野 耕司: 河川災害地調査および災害復旧支援のためのドローン測量技術の構築, 土木学会 AI・データサイエンス論文集, Vol. 5, No. 1, pp. 230-238, 2024.
- 5) Muraoka, K., Yokoyama, T., Yokoyama, N. and Sato, M.: Flight Verification of Automatic Flight and Transition System for Lift/Cruise Thrust Type VTOL Aircraft, Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci. Vol. 67, No. 5, pp. 285-294, 2024.

- 6) 佐藤昌之, 村岡浩治, 穂積弘毅, 眞田幸尚, 山田勉, 鳥居 建男 : 放射線モニタリング無人固定翼機の予見制御による高度制御性能向上, 日本航空宇宙学会論文集, Vol.65, No.2, pp. 54-63, 2017.
- 7) 野波健蔵: 世界のドローン開発動向と農業応用からみた課題と展望, 計測と制御, Vol.5, pp.780-787, 2014.
- 8) 日本機械学会: 令和5年度新産業創出等研究開発事業に係る調査事業(先端的ドローンの調査), 世界および日本における最先端のドローン開発の状況調査報告書, p.24, 2024.
- 9) 田崎勇一: Lidarを用いたSLAM技術の現状と展望, システム/制御/情報, Vol.64, No.2, pp.55-56, 2020.
- 10) 原田康平, 金亨燮, タンジュークイ, 石川聖二, 山村雄太郎, 山本晃義: ICP法を用いた頭部CT・MR画像の位置合わせ, MEDICAL IMAGING TECHNOLOGY, Vol.26, No.4, pp.246-250, 2008.
- 11) 平山秀夫, 辻本剛三, 島田富美男, 本田尚正: 海岸工学, pp.6-7, コロナ社, 2017.
- 12) 下ノ村和弘: ドローンの技術的側面—現状および課題と展望—, 国際交通安全学会誌, Vol.44, No.2, pp.16-23, 2019.
- 13) 上田建仁: 季報 エネルギー総合工学, Vol.29, No.4, pp.18-29, 2007.
- 14) 浅井広美: 2020年代の産業分野への利活用に向けたドローンの技術的進展, 物理探査, Vol.74, pp.123-130, 2021.
- 15) 国土交通省国土地理院: UAV搭載型レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル(案), pp.11-30, 2020.
- 16) (一社)港湾技術コンサルタンツ協会: 港湾工学, pp.195-196, 朝倉書店, 2021.
- 17) 国土交通省: 2050年の国土に係る状況変化 参考資料 砂浜保全に関する中間とりまとめ, 2015
- 18) 国土交通省: 海岸保全に関する取り組みの現状 資料2, 2019.
- 19) 国土交通省: 沿岸部における気候変動の影響及び適応の方向性
- 20) 富井隆春: ドローン搭載型グリーンレーザーの活用, 別刷 計測と制御, Vol.60, No.10, 2021
- 21) 国土交通省: 国土交通省におけるDX(デジタルトランスフォーメーション)の推進について, 2020.
- 22) 国土交通省: i-Constructionの推進 資料1, 2016.
- 23) 壺枝信二, 藤山達生, 門脇極, 横田智映, 渡辺智晴, 黒沼徳満, 塚本吉雄: グリーンレーザによる北海道留萌海岸の測量, 土木学会論文集B2(海洋工学), 72巻, 2号, 2019.
- 24) VuThiLanHuong, 菊雅美, 西浦洋平, 中村友昭, 水谷法美: 七里御浜井田海岸の海浜地形変化機構に関する研究, 土木学会論文集B2(海岸工学), 71巻, 2号, 2015.
- 25) 小澤淳真, 岡部貴之, 川村裕, 宮作尚宏, 橘菊生: 航空レーザ測深技術, 写真測量とリモートセンシング, 56巻, 6号, 2017.
- 26) 浜口耕平, 加藤史訓, 橋本孝治, 小金山透: UAVを用いた人工リーフの形状把握における海面での屈折の影響の補正法に関する検討, 土木学会論文集B2(海岸工学), 74巻, 2号, 2018.
- 27) 農林水産省農村振興局防災課, 農林水産省水産庁防災漁港課, 国土交通省水管理・国土保全局海岸室, 国土交通省港湾局海岸・防災課: 海岸保全施設維持管理マニュアル, 2014.
- 28) 国土交通省港湾局: 港湾の施設の点検診断ガイドライン実施要項, pp2-11, 2021.
- 29) 友納正裕: SLAM入門 ロボットの自己位置推定と地図構築の技術, オーム社, 2018.
- 30) 間野耕司, 堺浩一: グリーンレーザドローンの紹介, 写真測量とリモートセンシング, Vol.58, No.4, pp.172-173, 2019.
- 31) 国土交通省国土地理院: 航空レーザ測深機を用いた公共測量マニュアル(案), p.40, 2019.
- 32) 中井達郎: サンゴ礁保全の課題と地理学の役割, 日本地理学会発表要旨集, 2018a 巻 S201, 2018.
- 33) 富井隆春: ドローン搭載型グリーンレーザーの活用, 計測と制御, Vol.60, No.10, pp.735-738, 2021.
- 34) 山下浩昭, 日室裕貴, 端詰将範, 河原正史, 安藤有輝, 森大樹, 植木嘉朗, 安本善征: 砂浜管理に

における UAV グリーンレーザ計測の有用性に関する研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 78, No. 2, I_1057-I_1062, 2022.

第 6 章

- 1) 農研機構：農業におけるリモートセンシング・GIS・地理空間情報の活用, 2019
- 2) 井上吉雄：農業のスマート化に向けた先進リモートセンシングと空間情報技術, 第 9 回横幹連合カンファレンス, 電気通信大学, 2018. 10
- 3) 独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構 近畿中国四国農業研究センター：鉄コーティング湛水直播マニュアル, pp. 1-12, pp. 15, 2010
- 4) 国土地理院 基本図情報部：測量への無人航空機 (UAV) の導入に向けた検討状況について, pp. 3-30, 2016. 2
- 5) 千葉豪：フランスの圃場整備 (報文), 農業土木学会誌 第 54 巻 第 2 号, pp. 11-16, 1986
- 6) 瀬下隆, 伊藤淳士, 澁谷幸憲, 西脇健太郎：UAV リモセンの農業への活用研究, 「写真測量とリモートセンシング」, Vol. 55 No. 1, 2016
- 7) 竹内晴信, 関口建二, 北川巖, 竹中秀行：水稻湛水直播栽培におけるレーザ均平機を用いた圃場均平化の必要性, 北海道立農試集報 83, pp. 55-58, 2002
- 8) 長利洋：水田の均平状態の評価法に関する研究, 農業工学研究所報告 第 42 号, pp. 1-62, 2003
- 9) 浜口耕平, 加藤史訓, 橋本孝治, 小金山透：UAV を用いた人工リーフの形状把握における海面での屈折の影響の補正法に関する検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 74 巻, 2 号, 2018.
- 10) 下ノ村和弘：ドローンの技術的側面—現状および課題と展望—, 国際交通安全学会誌, Vo. 44, No. 2, pp. 16-23, 2019.

本論文の完成に寄与してくださった多くの方々に、心からの感謝を表明いたします。まず、主査としてご尽力くださいました岡山大学大学院環境生命科学研究科の吉田圭介准教授、副査としてご指導くださいました木本和志准教授に深く感謝いたします。細部にわたるご指導により、本研究の質を大きく向上させることができました。西山哲教授には、博士後期課程での研究の機会を与えていただき、論文指導だけでなく、現役学生との交流の機会を設けていただき、研究生活を豊かなものにしていただきました。先生方の的確なご助言により、本論文をまとめ上げることができました。心より感謝申し上げます。

国土交通省中国地方整備局岡山河川事務所の皆様には、貴重なデータをご提供いただき、研究の基盤を支えていただきました。株式会社パスコの皆様、特に新空間情報事業部、新空間技術部空間情報課の堺浩一さまには、博士課程での研究活動を支援していただき、心より感謝いたします。また、パスコの各部署の方々からは、技術提供や情報提供など、多岐にわたるサポートをいただきました。皆様のご協力なくして、本研究の遂行は不可能でした。

最後に、岡山大学西山研究室の現役学生、社会人学生、卒業生の皆様との交流は、研究生活に大きな刺激と励みとなりました。ここに挙げきれなかった多くの方々、家族を含め、本研究に関わってくださったすべての皆様に、心からの感謝を捧げます。