ドローンセンシングという新たな視点：水稲生育過程を定量的に記録し育種研究に活用

農研機構農業環境研究部門
坂本　利弘
農研機構作物研究部門
小川　大輔

1. はじめに

遠隔から対象物を非破壊観測するリモートセンシング技術は，作物の生育診断や収量予測に広く活用されている。古くは衛星画像や航空写真を用いた解析が主流であり，データの取得には多大なコストを要していた。しかし近年では，小型無人航空機（ドローン）の普及により，誰もが容易に空撮画像を取得できるようになり，空間情報解析を基盤とする研究手法が急速に発展している。ドローンに搭載された各種センサーを用いた計測手法は，一般に「ドローンセンシング技術」と総称されることもあるが，その技術的アプローチは多岐にわたる。対象作物や評価形質，さらには研究目的が基礎的データの取得を重視するのか，応用的な利活用を志向するのかによって，選定されるセンサー (可視・近赤外・熱赤外カメラ，ハイパースペクトルセンサ，LiDAR 等) の種類，飛行高度，撮影時期，解析手法などの技術構成は一様ではない（井上・横山 2017; Tanaka *et al*. 2024; Bongomin *et al*. 2024）。

近年，人工知能（AI）モデルとドローンによる空撮カラー画像を組み合わせた技術の発展が目覚ましく，数多くの研究成果が報告されている。例えば，高度 15 mからの空撮画像からブロッコリーの花蕾サイズを個体レベルで推定し，生育モデルおよび気象予報データと統合することで，約 10 日先の収穫サイズを予測する技術が開発されている。(郭威ら 2023)。また，低空飛行（高度 3m）からの空撮画像からトウモロコシの雄穂の開花状況を検出する AI モデル (大澤ら 2024) や，高度 30 ～ 35m からの空撮画像を用いて，オーチャードグラスの草勢，越冬性，罹病程度を育種家と同等の精度で評価できる AI モデル (秋山ら 2020) に関する研究も進展している。地上撮影による高解像度カラー画像から麦の穂数を自動計測する AI モデル（David *et al*. 2020）や，高度 18m から光学ズームカメラで取得された時系列空撮画像を用いて，AI モデルで水稲の穂数を測定し，出穂日を高精度に推定する技術（Chen *et al*. 2024）も開発されている。このような AI による物体認識技術の活用は，フェノタイピング作業の省力化において大きな進展である。一方で，葉の下に隠れて画像上で確認できない穂については，AI による計測が困難であるため，従来の手作業による計測手法を完全に代替するに至らない点に留意する必要がある。

ドローンセンシング技術を活用した企業活動として，ゴルフ場やサッカー場の芝生管理を目的とした植生調査サービスが提供されている（Drone Okinawa 2025; Pix4D 2025）。ドローンに搭載されたマルチスペクトルカメラを用いて，可視域および近赤外域の空撮画像を取得し，簡易な画像処理によって植生指数マップを作成することで，芝生の生育ムラを可視化し，精密な栽培管理に資する情報を提供する。一方，収益事業の確立には至らなかった事例も少なからず存在する。2017 年にヤンマー株式会社とコニカミノルタ株式会社の共同出資により設立されたファームアイ株式会社（ヤンマー株式会社 2017）は，ドローンに搭載されたマルチスペクトルカメラを用いて，水稲の葉色を把握し，地力マップを作成することで，生育診断や肥料設計，さらに無人ヘリによる可変施肥に対応するなど，当時としては画期的かつ先導的な農業コンサルティングサービスを展開した。しかしながら，ファームアイ株式会社は 2021 年にヤンマー関連会社との合併を経て，事業会社としての役割を終えた。近年，農業 ICT 市場の成長には大きな期待が寄せられているものの，機材の初期導入コストに加え，操縦者および補助者の人件費等に起因するランニングコストが高額であることから，それらに見合う安定的な収益の確保は依然として課題となっている。このことは，当該技術を活用した事業の持続的な拡大が容易ではないことを示唆している。

以上のように，ドローンセンシング技術は基礎研究から営利活動に至るまで，その活用範囲を着実に広げつつある。本稿では，まず前半において，ドローンセンシング初心者が留意すべきポイントについて，筆者らの視点をもとに概説する。後半では，筆者らが先進的に取り組んでいる作物育種研究分野への応用事例を紹介する。筆者らの限られた経験に基づく知見も多く含まれるが，これからドローンセンシング技術の導入を検討している読者にとって，有益な手がかりとなることを期待する。

2. ドローン選びのポイント

ドローンの選定において初心者によくある失敗例の一つに，専門家との事前相談を十分に行わないまま，高額な最先端センサーの導入を研究提案書に盛り込んでしまうことが挙げられる。センサースペックを過度に重視した研究提案を行うことで，当該センサーを搭載可能な機体が限定され，結果として初心者にとって運用・管理の面で心理的および技術的負担が大きい大型の産業用ドローンを購入せざるを得ない状況に陥ることがある。さらに，研究目的に対して導入予定のセンサーの性能が過剰であることが後に判明するケースや，取得されたデータの解析に必要となる専用ソフトウェアの予算計上が行われておらず，後になって予算不足に困る事例も散見される。現在では，小型ドローンであっても高性能なセンサーを標準搭載しており，費用対効果に優れた機体が市販されている。また，純正の付属ソフトウェアによるオートパイロット機能を活用することで，高品質なデータ記録と安定した飛行制御を一体的かつ容易に実施することが可能である。必ずしも最先端かつ高額なセンサーを用いなくとも，撮影手法や取得後の解析方法を工夫することで，小型ドローンによる空撮画像から，研究目的に適したデータを効率的に取得することが可能である場合もある。

DJI 社は，小型ドローン市場における主要メーカーの一つであり，高い市場占有率と技術力を有している。同社製品の選定にあたっては，研究目的や運用環境に応じた慎重な検討が求められる。現在，同社はホビー用途や映像クリエイター向けのモデルと，写真測量などの産業用途向けモデルとを明確に区別したラインナップ展開をしている。前者としては，小型で高性能なカメラを搭載した DJI Mavic 4 Pro が，動画撮影やスナップ写真的な空撮に適しており，比較的リーズナブルな価格帯で入手可能である。一方，被写体の三次元形状の復元や高解像度オルソモザイク画像の生成を目的とする測量業務や研究用途においては，写真測量に適した自動航行撮影ソフトウェア（例：DJI GS Pro，DJI Pilot2）に対応した機種を選定することが望ましい。後者の産業用途向けモデルである DJI Mavic 3M は，高解像度の RGB 画像に加え，緑・赤・レッドエッジ・近赤外の 4 波長から構成されるマルチスペクトル画像を同時に撮影することができる。また，RTK（Real-Time Kinematic）測位モジュールを搭載しているため，SfM（Structure from Motion）および MVS（Multi-View Stereo）解析を行う際に，高精度な位置情報に基づく三次元モデルの構築が可能である。

近年，政府関連機関においては，サイバーセキュリティ上の懸念を背景に，国産ドローンの調達および活用が積極的に推進されている。中でも，ACSL 社が開発した小型ドローン「SOTEN」は，標準搭載のカラーカメラ（CX-GB100）に加え，マルチスペクトルカメラ（CX-GB300），熱赤外カメラ（CX-GB200），光学ズームカメラ（CX-GB400）などのオプションセンサーに換装可能であり，用途に応じた柔軟な運用が可能である (https://product.acsl.co.jp/)。初代 SOTEN は RTK（Real-Time Kinematic）測位には対応していないものの，日本の準天頂衛星システム「みちびき（QZSS）」が提供するサブメータ級測位補強サービス（SLAS）に対応している。このため，日本国内においては，インターネット回線を介した補正信号の受信を行わずとも，約 1m の精度を有する位置情報付き空撮画像の取得が可能である。SOTEN に搭載可能な熱赤外カメラは，火災現場における異常熱源の検出など，ライブストリーミング映像を用いたリアルタイム監視に有効である。一方，当該カメラは絶対温度を数値として記録する仕様ではないことから，農作物の表面温度を解析することを目的とした研究には適していない。このため，導入に際しては本仕様上の制約を十分に考慮する必要がある。

3. 高精度な空間情報を取得するための技術的要点

ドローンセンシングデータから高精度な空間情報を取得するためには，撮影支援用の補助機材（対空標識，測量機器，マルチスペクトル画像の反射率補正に用いる標準反射板）に加えて，データ解析に用いる専用ソフトウェア（SfM/MVS 解析ソフトウェア，GIS・リモートセンシング解析ソフトウェア）の導入が不可欠である。また，初心者によく見ら

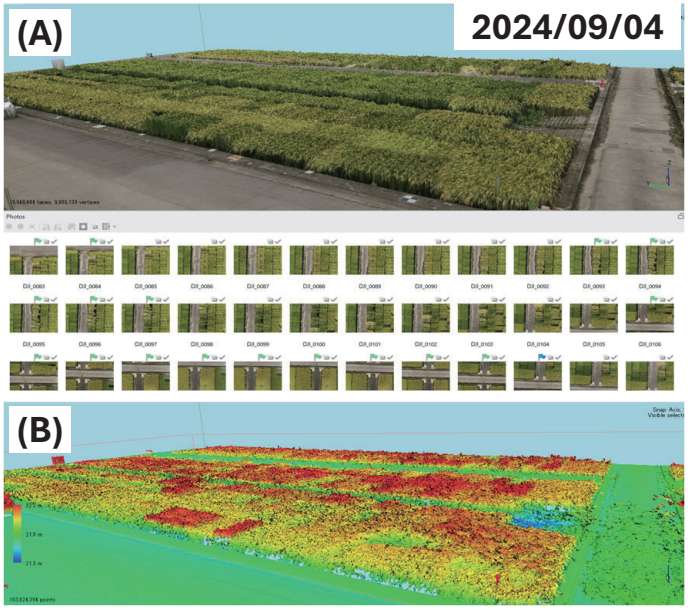

図 -1　ドローン空撮画像および SfM/MVS 解析ソフト（Agisoft MetaShape）による水稲群落の三次元モデリング
A：三次元カラーポリゴンモデル
B：高さ情報に基づき色分けされた高密度点群データ

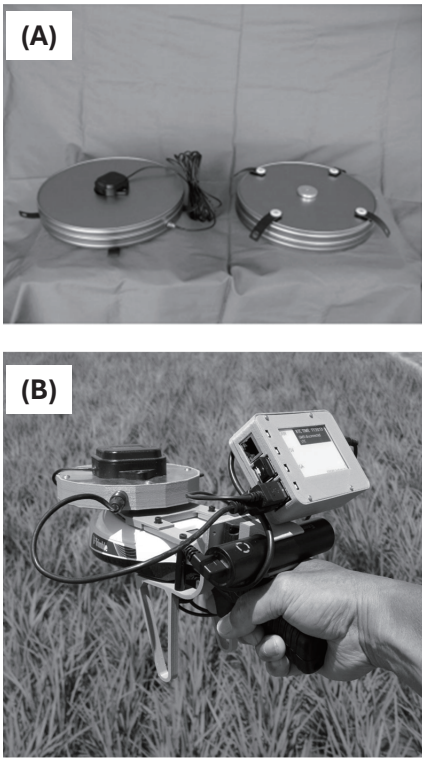

図 -2　A）2 周波 GNSS RAW データロガー「AID-GNSSLOG-003」
B ）GreenSeeker 用ロガ Model AID-GSLOG-001
http://www.oyokogei.com

れる失敗例として，対空標識や標準反射板を設置せずに空撮を実施し，画像間のオーバーラップ率も不十分な状態で空撮を行うケースがある。こうした場合，たとえ後処理段階で専門家の助言を得ようとしても，位置精度の確保や分光反射率の補正には根本的な限界が生じる。

3.1. 高精度な三次元モデル構築のために必要なツール（対空標識・GNSS 測量）

ドローン空撮画像を入力データとして SfM/MVS 解析を行い，高精度な三次元モデルを再構築するためには，圃場周辺に複数の対空標識を設置した上で空撮を実施することが望ましい。さらに，設置した対空標識の中心点における位置座標（緯度・経度・標高または楕円体高）を測量機器により高精度に計測し，その情報を位置補正データとして SfM/MVS 解析ソフトウェアに入力することで，生成される三次元モデルの幾何精度を大幅に向上させることが可能となる。ドローン本体に RTK（Real-Time Kinematic）測位モジュールが搭載されておらず，高精度な位置情報をカメラ画像に直接記録できない場合には，対空標識の設置が不可欠である。RTK 測位モジュールを搭載したドローンを使用する場合であっても，同一の試験圃場を定期的に撮影し，作物の生育に伴う時系列的な変化情報を取得することを目的とした試験においては，恒久的な基準点として，敷地内の道路やコンクリート面にペンキ等で描画した対空標識を設置することが望ましい。一般的に，RTK 測位精度は，水平方向で 2 ～ 3 cm，鉛直方向で 3 ～ 4 cm とされている。恒久的な基準点として設置された対空標識の位置情報を解析に組み込むことで，時系列で誤差が 1 cm レベルの高精度な三次元モデルの構築が可能となる（図 -1）。

対空標識の位置座標を測定する際には，RTK 測位に対応した GNSS 受信機（例：ビズステーション社製 Drogger DG-PRO1RWS）を用いることで，効率的かつ高精度な測位が可能となる。ビズステーション社製の Drogger を用いて RTK 測位を行う場合には，専用アプリをインストールした Android スマートフォンに加え，SoftBank 社が提供する Ichimill 等の補正情報配信サービスの契約が必要となる。補正情報配信サービスの利用には利用料が発生するため，事前に当該費用を予算計上しておくことも必要である。また，RTK 測位よりも高精度に位置測定を行う手法として，RTKLib 等のソフトウェアを用いた後処理による静的干渉測位法（Post-Processed Static：PPS）もある（坂本ら 2019）。静的干渉測位法では，対空標識 1 点につき 30 分から 1 時間程

度の受信時間が必要である。そのため，複数の基準点の受信データを効率よく取得するには，複数台の GNSS 受信機を同時運用することが有効である。例えば，有限会社木村応用工芸が製造する 2 周波 GNSS RAW データロガー「AID-GNSSLOG-003（http://www.oyokogei.com）」は，スマートフォンを用いることなく，受信データを SD カードに直接記録する仕様となっており，現場における作業性に優れている（図 -2）。

3.2. 標準反射板・GreenSeeker

マルチスペクトル画像における輝度値（デジタル数値）を分光反射率へ変換する際には，一般的に以下の二つの補正手法が用いられる。一つは，マルチスペクトルカメラあるいはドローン本体に搭載された太陽光センサーの出力値を基に補正を行う方法である。もう一つは，空撮の前後に撮影された，分光反射特性が既知の標準反射板の画像データを参照して補正を行う方法である。太陽光センサー値に基づく補正は，大気中の水蒸気量の変動や雲の通過などに伴って生じる太陽入射光量の変化に起因する，相対的な輝度変化を補正する手法として有効である。一方，標準反射板を用いた補正は，分光反射率が既知の基準面を参照することにより，画像の輝度値を絶対的な反射率へと変換する手法として適している。天候に応じてどちらか片方の補正法を選択する研究事例もあるが，筆者らは，これまでの経験に基づき，天候の状態にかかわらず両手法を併用する補正方法を採用している。

MicaSense 社製の標準反射板（MicaSense Calibrated Reflectance Panels：CRPs）は，ドローン搭載型マルチスペクトルカメラによる画像の反射率補正において，多くの研究者に利用されている。SfM/MVS 解析ソフトウェアである Agisoft MetaShape には，本標準反射板に付属する QR コードを自動的に読み取り，反射面の正確な位置を認識する機能が実装されている。この機能を活用することで，後処理における反射率補正作業の効率化が図られる。ただし，本製品は，MicaSense 社製マルチスペクトルカメラの保有者を対象として販売されている上に，近年の円安傾向および物価上昇により，以前よりも価格が高騰している。一方，株式会社 Quantomics が販売する標準反射板は，MicaSense 社製品と比較して約半額の値段で提供されている (https://ja.quantomics.co.jp/)。反射板の位置を自動認識するための QR コードは付属していないものの，分光反射率情報が付加された「グレー」および「ホワイト」の 2 種類の反射板が同梱されており，費用対効果の面でも優れている。

マルチスペクトル画像から算出される植生指数データは，標準反射板による補正を施した場合であっても，撮影時間帯や天候条件，カメラに装着された分光フィルタの波長特性，さらには SfM/MVS 解析ソフトウェアにおける補正アルゴリズムの違いなど，複数の要因によって影響を受ける可能性があることに留意する必要がある（Fawcett and Anderson 2019; Di Gennaro *et al*. 2022; da Silva *et al*. 2024）。これらの撮影条件や使用機材の差異に影響を受けた植生指数をさらに補正する方法として，株式会社ニコン・トリンブル製 GreenSeeker などのアクティブ型近接リモートセンシングセンサーによる計測値を基準として再補正する方法が提案されている。GreenSeeker とドローン撮影によるマルチスペクトル画像を併用した研究においては，GreenSeeker によって再補正された植生指数に基づき，水稲の追肥量を決定する手法が提案されている（Nakano *et al*. 2023）。GreenSeeker は，外部アタッチメント機材を装着することで，近赤外域および赤色域の反射率を小数点以下 3 桁の精度で取得することが可能である (木村応用工芸 , http://www.oyokogei.com)。また，GreenSeeker データと GNSS 受信情報を同時に取得することにより，高精度な位置情報に基づいて，GreenSeeker による植生指標値とマルチスペクトルオルソモザイク画像とを比較することが可能になる。(図 -2B，坂本・小川 2022)。

3.3. SfM/MVS 解析ソフト

ドローンから水田を鉛直下向きに撮影した場合，画像中心部（ドローン直下）では，直立した状態の水稲を真上からの視点で記録することができる。一方，画像の辺縁部では，広角レンズの影響により斜め上方からの観測角度で撮影されるため，画像上では水稲があたかも倒伏しているかのように記録される。このようなレンズ特性やカメラの向きに起因

する画像の幾何学的歪みを補正し，複数の空撮画像を統合して，全体にわたり真上から撮影されたかのような高解像度の一枚画像を生成するには，オルソモザイク処理が必要不可欠である。SfM/MVS 解析ソフトウェアは，画像上の特徴点に基づいた画像間の対応点を抽出し，カメラの内部パラメータ（焦点距離，主点位置，レンズの歪み係数など）および外部パラメータ（カメラの位置および姿勢など）を推定し，対象物の三次元点群データを生成する。この三次元情報をもとに，被写体の起伏やカメラの傾きに起因する幾何学的歪みを補正することが可能となり，あたかも真上から観測したかのような正射投影画像（オルソ画像）を生成する。SfM/MVS 解析ソフトウェアの代表的なものとしては，Agisoft 社の MetaShape および Pix4D 社の Pix4DMapper が挙げられ，これらは実務および研究の現場において広く利用されている。SfM/MVS 解析ソフトウェアの初期導入費用およびライセンス維持費は，メーカー，製品の種類，販売形態（例：年間利用ライセンス，買取ライセンス）によって大きく異なる。中でも，Agisoft 社が提供する MetaShape は，初期導入費用が比較的安価であり，これまでのところバージョンアップに伴う追加費用が発生していない点が大きな利点であり，大学や研究機関において広く導入されている。さらに，MetaShape は Pix4DMapper と比較して解析の自由度が高く，目的に応じた解析パラメータの微調整や処理過程の柔軟な変更が可能である。（Sakamoto and Ogawa 2022）。一方で，国産ドローン「SOTEN」によって取得された空撮画像については，メーカーにより Pix4DMapper の使用が推奨されている。MetaShape においても処理過程を工夫することで，「SOTEN」に搭載されたマルチスペクトルカメラで取得された画像データを反射率画像へと変換することは可能である。ただし，MetaShape と Pix4DMapper では，太陽光センサーや標準反射板画像を用いた輝度値から反射率への補正アルゴリズムが異なるため，同一の「SOTEN」マルチスペクトル画像を用いた場合でも，両ソフトウェアから出力される反射率画像の値が一致するとは限らない。この点については，解析結果の比較や精度評価を行う際に十分留意する必要がある。また，SfM/MVS 解析ソフトウェアにおける高密度な三次元点群の生成過程では，膨大な計算資源およびメモリ空間を必要とする。そのため，短時間で効率的な解析を実施するには，十分な性能を有したグラフィックボード，比較的新しい世代の CPU，大容量のメインメモリを搭載したコンピューターの利用が望ましく，これらを整備するための予算の確保も重要な検討事項となる。

3.4. 法令順守・安全配慮の工夫

筆者らは，高度 10 ～ 20m の低空飛行による空撮試験を実施している。基本的には，第３者が無許可で立ち入ることができない研究機関の敷地内で実施しているが，状況によっては，航空法に定められた「人または物件から 30m 以上の距離を確保できない飛行」に該当する可能性もありうる。このため，筆者らは，法令遵守の観点から，飛行場所・操縦者・機体情報を明示した上で，毎年，国土交通省東京航空局に対して特定飛行に関する許可申請を事前に行うこととしている。さらに，ドローン情報基盤システム 2.0（DIPS2.0，https://www.ossportal.dips.mlit.go.jp/）による飛行計画の事前通報，飛行日誌の作成・携行，許可証の携行など，関連法令に基づく運用を徹底している。また，飛行実施時には，立入規制のための目印の設置や観測補助員の配置などを行い，安全確保に努めている。一般に，分光計測に適した時間帯は，太陽高度の変化が比較的少ない午前 10 時から午後 2 時とされている。しかし筆者らは，あえて始業前の午前7時 30 分ごろから空撮試験を開始することで，人身事故リスクおよび操縦者の心理的負担の軽減を優先している。さらに，太陽高度が高い時間帯には，画像内の水面に太陽光が反射して映り込み，反射光によって周囲の水稲が白とびする現象が生じることがあるため，画像品質の低下を防止する観点からも，早朝の撮影を行っている。

4. ドローンセンシング技術の育種研究への活用

ここからは，ドローンセンシング技術の育種研究への活用事例について紹介する。育種とは，その名の通り「種を育む」ことであり，品種を育成することを意味する。作物の品種は，多様な遺伝資源を交雑した集団の中から，有用

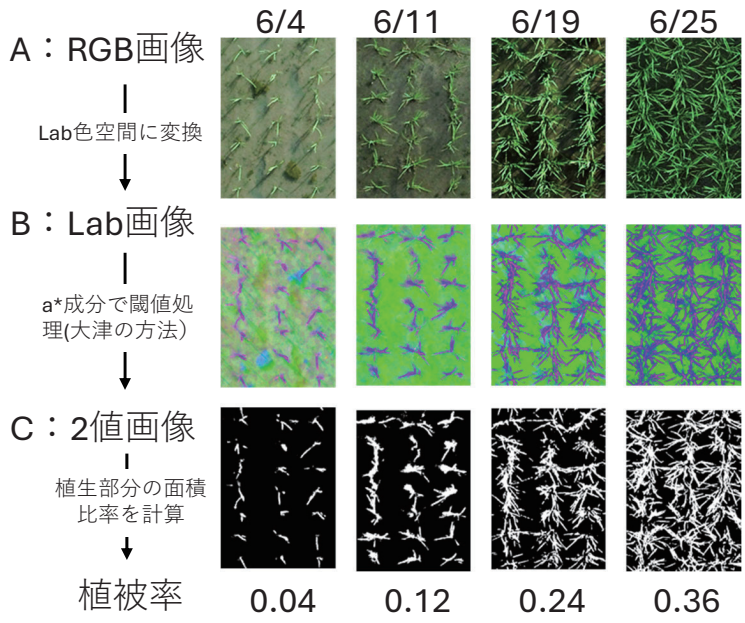

図 -3　RGB 画像を用いた植被率算出のための２値画像作成手順（2024 年６月のコシヒカリ栽培プロット）
A：原画像（RGB）―ドローン撮影による RGB 画像。
B：Lab 色空間画像 ―明度（L*），赤緑軸（a*），黄青軸（b*）の各成分を RGB バンドに割り当てて可視化。
C：２値化画像 ― 植生被覆部分を白色，非植生部分を黒色で表現。

遺伝子に紐づく DNA マーカーや収量・品質データを基に選抜・育成される。この収量・品質データの取得は人の手によって行われるため，膨大な時間と労力を要し，育種の推進における大きなボトルネックとなっている。こうした背景から，筆者らは育種の省力化・効率化を目指し，ドローンセンシングの有効活用場面を見出すため，農研機構内の専門的バックグラウンドの異なる研究者が連携して（農業環境研究部門：リモートセンシング・画像処理，作物研究部門：遺伝解析，農業情報研究センター：統計・数値解析），これまでに複数の取り組みを実施してきた。

4.1. 水稲の育種研究圃場におけるドローン撮影手法

水稲を対象としたドローン観測試験は，2018 年より約 10 アールの圃場で開始し，2025 年には約 20 アールに拡張した。１つの稲系統に対し 33 個体を３列 ×11 行（畝間 30cm，株間 18cm）で栽培することで，最大 800 系統を群落レベルで同時観測することができる。空撮試験は概ね週１回の頻度で実施した。開始当初は DJI 社製 Phantom 4 Pro のみを使用していたが，2021 年以降は P4 Multispectral を併用し，マルチスペクトル画像も取得している。本ドローン搭載カメラには光学ズーム機能がないため，高解像度画像を取得するためには，飛行高度を可能な限り低く設定する必要があり，Phantom 4 Pro については地上高度 10 m に，P4 Multispectral の飛行高度は地上高度 20 m に設定している。自動撮影飛行においては，画像間のオーバーラップ率を 80%に，飛行速度を約１～ 1.5 m/s に調整し，ピンボケ画像の取得を防止するため，Phantom 4 Pro については自動撮影飛行の開始前に，機体を手動操作で地上高度 10 m まで上昇させ，モニター上で稲に焦点が合うようオートフォーカス機能を用いてピントを調整した後，マニュアルフォーカスに切り替えることでフォーカス値を固定している。なお，P4 Multispectral の付属カメラは無限焦点仕様であり，フォーカス調整は行えない。

4.2. 植被率に関わる遺伝子座の同定

稲には合計約３万の遺伝子があり，一部の遺伝子の機能は明らかにされている一方で，多くの遺伝子の機能が未解明のままである。稲の遺伝子は，12 本の染色体の様々な場所に遺伝子が座乗している。育種では，DNA マーカーにより有用な遺伝子を持つ稲を選ぶことができることから，育種の効率化のため，有用遺伝子の場所（遺伝子座）を明らかにすることが求められる。筆者らはまず初めに，稲の初期生育の指標となる植生被覆率（以下，植被率）に関連する遺伝子座の同定を試みた (Ogawa *et al*. 2021)。

４つの日本型品種（あきだわら，べこごのみ，タチアオバ，ミズホチカラ）と４つのインド型品種（水原 258 号，タカナリ，北陸 193 号，ルリアオバ）を交雑して作出した多系交雑集団（合計 165 系統）について，経時的な圃場空撮画像を取得した。植被率は，各系統９個体（90cm × 54 cm）の画像を対象に，赤緑青から CIE Lab 色空間に変換した後，Otsu の手法により２値化処理を施し，地表面に対する植物被覆領域の割合から算出した。植被率の算出手順については，コシヒカリの空撮画像を例に図 -3 に示す。植被率にかかわる遺伝子座を明らかにするため，育種研究において標準的な手法であるゲノムワ

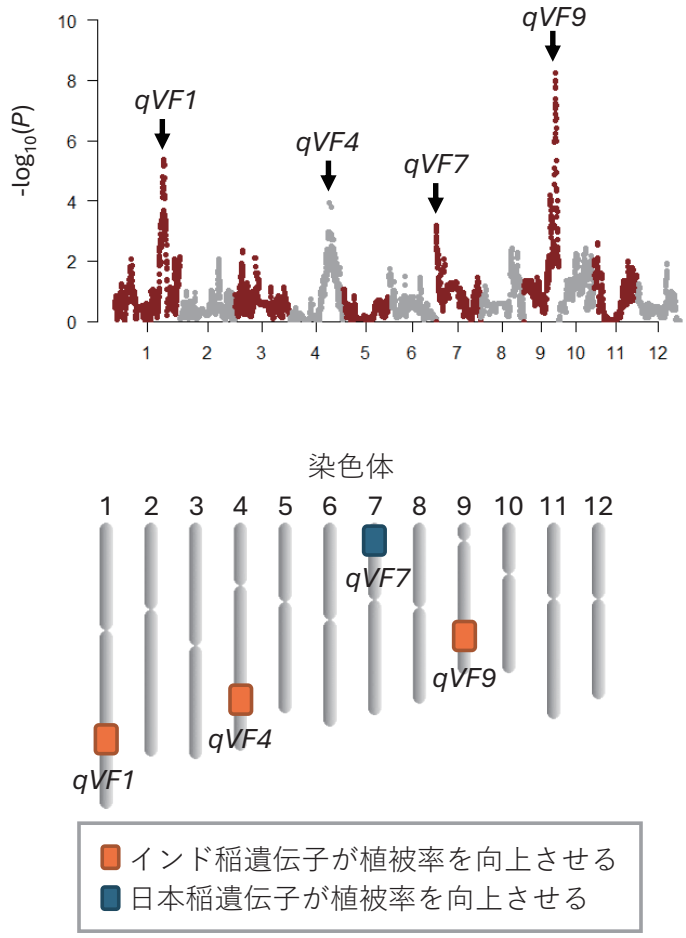

図 -4　植被率のゲノムワイド関連解析
A：植被率のゲノムワイド関連解析の結果のプロット。多系交雑集団を用いた植被率のゲノムワイド関連解析によって算出された P 値について，第 1 染色体から第 12 染色体まで横一列に並べて図示した。P 値を基準に 4 遺伝子座を同定し，*qVF1*，*qVF4*，*qVF7*，*qVF9* と命名した。B：*qVF1*，*qVF4*，*qVF7*，*qVF9* の染色体位置。稲には 12 本の染色体があり，各遺伝子座のおおよその位置を示した。

イド関連解析を実施した（図 - 4）。算出された P 値を基に合計 4 座（*qVF1*，*qVF4*，*qVF7*，*qVF9*）を同定し，*qVF1*，*qVF4*，*qVF9* はインド稲の遺伝子が，*qVF7* は日本稲の遺伝子が植被率向上に作用し，興味深いことに，*qVF1*，*qVF7*，*qVF9* は初期生育だけでなく収穫期の乾物重や子実収量に寄与することが示唆された。

4.3. 群落草高に関わる遺伝子座の同定

SfM/MVS 解析ソフトの技術的革新は，空撮画像を入力するだけで，作物の高さ情報を含む三次元モデルを容易に取得できる点にある。稲の稈の長さや草丈は，乾物重や葉面積指数（LAI）と高い相関を示すことから，生育量評価における基本かつ重要な指標とされる。従来は，空撮画像を用いた茎葉の色彩情報や植被率といった二次元的な表現型情報の解析が主流であった。しかし，本技術は「高さ」という新たな表現型指標を，非侵襲的かつ高効率に多数のサンプルに対して計測可能とする点において，農学分野における革新的な計測手法として位置付けられる。

筆者らは，ドローンセンシング技術を用いて，前述の多系交雑集団を対象に群落草高を計測し，草高に関連する遺伝子座を調査した (Ogawa *et al*. 2021)。草高に関わる複数の遺伝子座が季節変化に応じて変わることから，遺伝子座を時系列に表す手法として「フェノロジカル遺伝子座マップ」を考案し，最終的に 11 の遺伝子座を明らかにした（図 -5）。見出された遺伝子座の 1 つ *qCH1-4* は，作物の半矮性化により多収を実現した緑の革命で知られる *sd1* 遺伝子で栽培期間を通して草高の制御に寄与した。また，更なる解析により，3 つの遺伝子座（*qCH1-4*，*qCH2*，*qCH10-2*）は，草高制御を通して，トレードオフの関係にある子実収量と茎葉への光合成産物の配分に関与する可能性が明らかになった。

4.4. 穂の開帳性に関わる遺伝子座の同定

光合成効率に重要な草型や登熟期の倒伏程度の定量化を目的に「穂の開帳性（穂がどの程度直立しているかまたは広がっているかの度合い）」の評価を試みた。穂首部分に 1 個体，最大 8 枚の赤色フェルト製目印を設置し，空撮画像からそれらの位置を検出した (Ogawa *et al*. 2019)。本試験は水稲品種「北陸 193 号」と「ミズホチカラ」の交雑系統（81 系統）の集団を対象とし，ドローンによる空撮を 2018 年 6 月 18 日（栄養生長期：出穂前）および 2018 年 9 月 20 日（生殖生長期：出穂後）に実施した。SfM/MVS 解析ソフトウェアにより作成されたオルソモザイクカラー画像の一部を切り出して画像解析を行った。リモートセンシング解析ソフト (ENVI/IDL NV5 Geospatial 社) の機能を使い，マウス操作で植生期の画

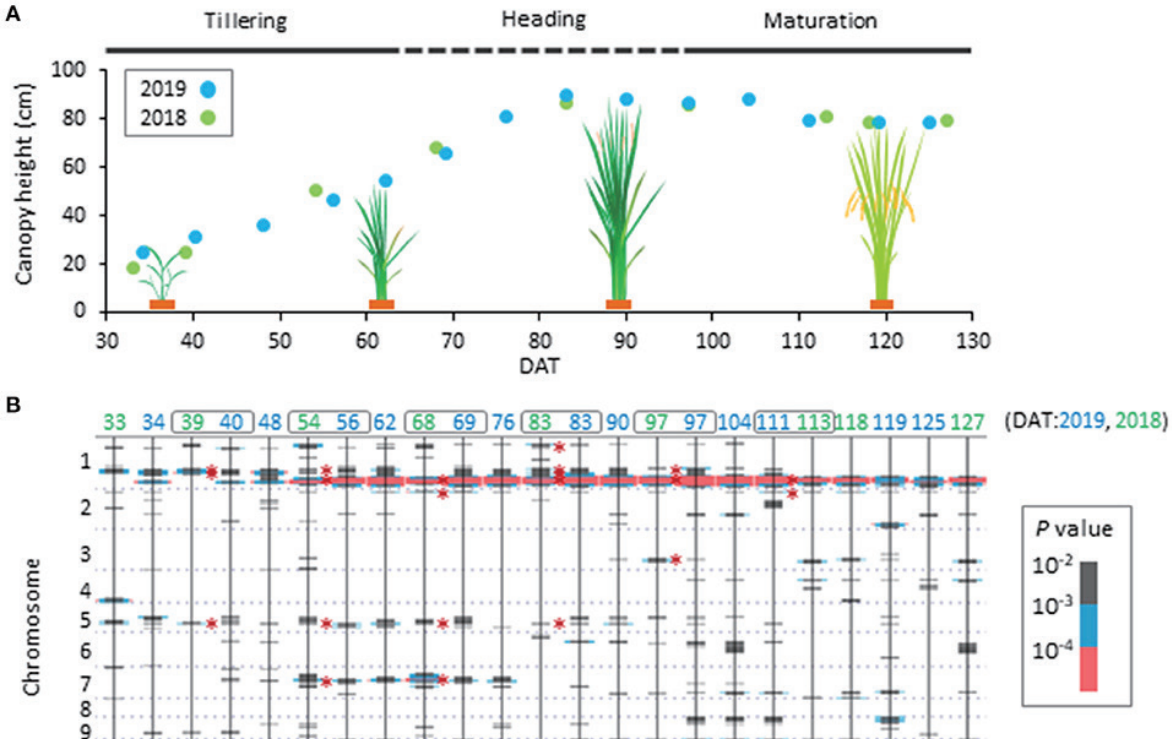

図 -5　JAM 系統の群落草高における遺伝子座の出現の経時的パターン
(A) JAM 系統の群落草高（CH）の表現型変化の模式図。165 の JAM 系統の群落草高の平均値をプロットした。発達過程には分げつ期，出穂期，成熟期が含まれる。(B) JAM 系統の群落草高に関するゲノムワイド関連解析（GWAS）の概要。2019 年および 2018 年に収集されたデータの結果を，DAT（圃場移植後日数）別に昇順に左から右に並べ表示した。P 値が 10^{-2} 未満の位置には，灰色，青，ピンクのバーを追加した。本研究では，灰色のボックスで示された 6 つの DAT の時点に注目した。定義された遺伝子座はアスタリスク（＊）を付記した。Ogawa *et al*., 2025, Frontiers in Plant Science, Frontiers in plant science 12 (2021): 715184. より転載 (CC BY 4.0)

像からは株の中心位置を，出穂期の画像からは赤色目印（穂首位置）の位置をピックアップし，稲株の中心位置から穂首までの水平距離の平均値（Panicle Position: PP）を「開帳性」に関する定量指標として算出した。この新たなフェノタイピング指標である PP は，圃場においてレーザー距離計を用いて計測した地面に対する葉鞘の角度および穂首部分の角度，ならびに人による圃場での達観調査による開帳性スコア（SSH）との間に有意な相関関係が示された。PP に関わる遺伝子座について詳細に調べたところ，最も効果の高い遺伝子座では既知遺伝子の TAC1（Tiller Angle Control 1）が作用していると推定された。その他の遺伝子座は，統計的に中程度の遺伝的寄与ではあるが，収量関連形質（1 穂当たりの穂重，粒重，粒数）とも有意な関係性が認められた。

4.5. ドローンセンシングデータを用いた稲の形質予測

稲の圃場あるいは収穫後に取得する形質を，もしドローンセンシングデータから予測することができれば，育種の省力化・効率化を飛躍的に加速することができる。我々は，茨城県つくばみらい市にある谷和原圃場において栽培された日本の水稲 30 品種を対象に，定期的なドローン空撮による時系列草高データに非線形モデルを適用し，品種ごとの生育速度や季節変化の特徴をモデルパラメータとして抽出した (Taniguchi *et al*. 2022)。そして，各モデルパラメータに対して品種・栽培年・交互作用を変量効果として明示した線形混合モデル（LME）を構築し，稈長，地上部乾物重，茎葉重，出穂日に関する遺伝的能力の説明を試みた。ドローンセンシングによる草高は稈長の遺伝的能力と強い相関（r = 0.89）を示し，草高が最大となる日は出穂日，地上部乾物重，茎葉重とも高い相関を示した。また，線形重回帰モデルによる表現型予測では草高 r = 0.82，出穂日 r = 0.89，乾物重 r = 0.72，茎葉重 r = 0.81 と高い水準であった。籾重は相関が低く予測困難であったが，ドローンで得られる非等間隔の草高データを時系列モデルで要約することで，形質予測に有効な指標が得られた。本手法は，今後その汎用性についての検証が求められるものの，育種における省力化および効率化に貢献し得る重要な研究成果として位置づけられる。

5. ドローンセンシングによる客観情報による品種・系統比較

ドローン観測用の供試圃場には，試

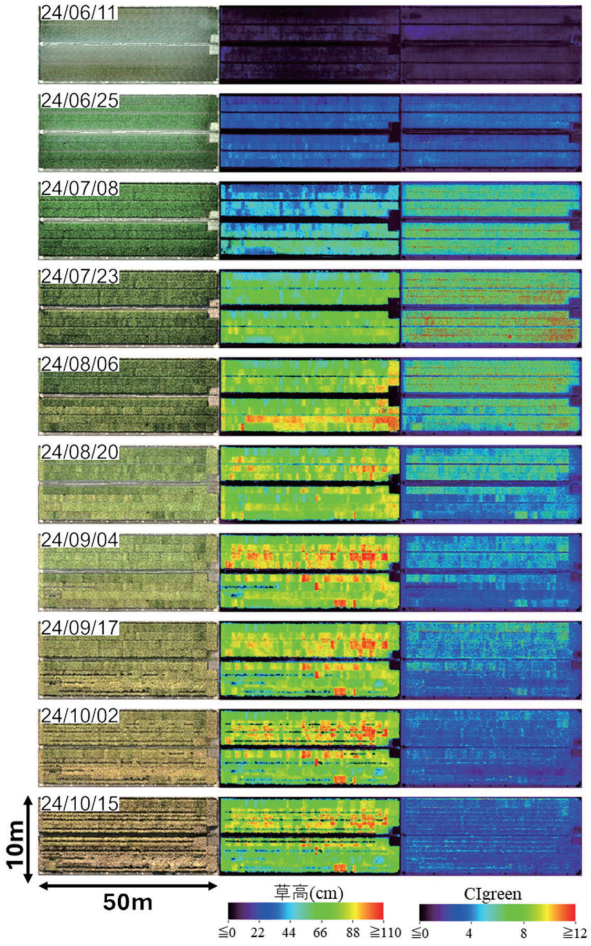

図 -6　ドローンを用いた水稲多系交雑集団の時系列生育モニタリングの例 (2024 年)
左列：オルソカラーモザイク画像，中央列：SfM/MVS 解析による草高推定値，右列：マルチスペクトル画像から算出した植生指数（クロロフィルインデックス）

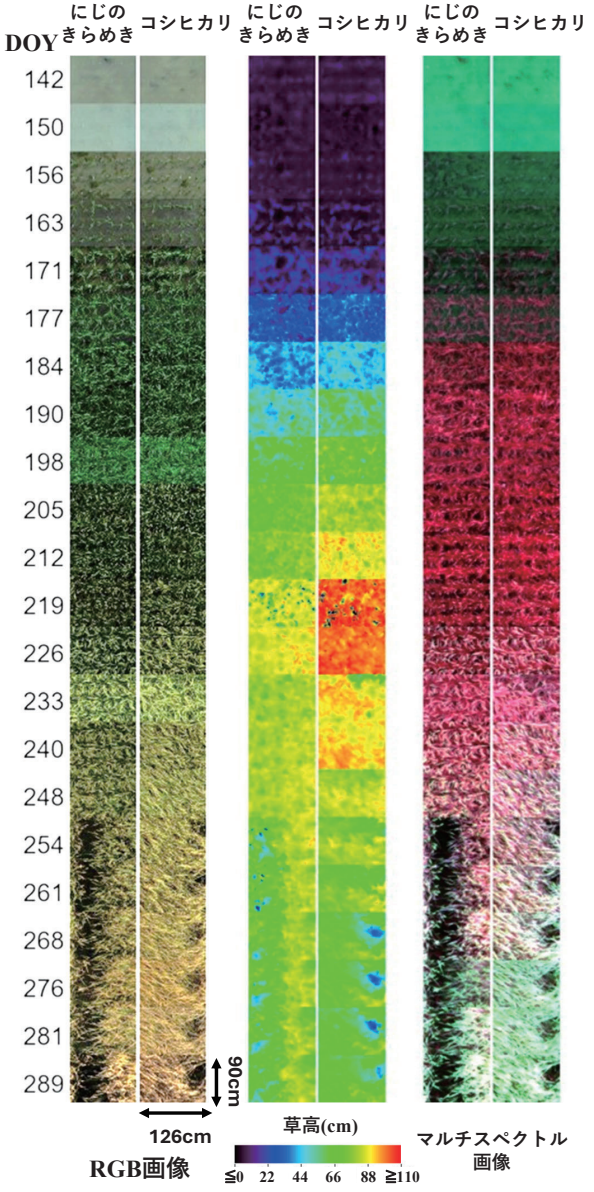

図 -7　ドローンデータによる「にじのきらめき」と「コシヒカリ」の生育比較
左列：カラー画像，中央列：SfM/MVS 解析による草高推定結果，右列：マルチスペクトル画像に基づく疑似カラー表示（近赤外・赤・緑の反射率画像をそれぞれ R・G・B バンドとして構成）

験系統以外にも，多様な品種・系統を継続的に栽培し，定期的な空撮試験を実施している (図 -6)。農研機構が開発した品種「にじのきらめき」と「コシヒカリ」について, RGB 画像, 草高推定画像, マルチスペクトル画像を用いて，1 週間ごとの生育変化を時系列で比較した結果を図 -7 に示す。さらに，同一区画における草高の 95 パーセンタイル値および, マルチスペクトル画像から算出した植生指数（CIgreen，NDVI）の領域平均値の季節変化を図 -8 に示す。CIgreen は，NDVI に比べて植被率の増加に伴う指標値の飽和が生じにくく，単位面積当たりのクロロフィル量と高い相関関係を示すことが報告されている。CIgreen (Gitelson *et al*. 2005) と NDVI (Rouse *et al*. 1974) の計算式は以下のとおり。

$$\mathrm{CIgreen} = \frac{R_{NIR}}{R_{Green}} - 1 \quad \cdots (1)$$

$$\mathrm{NDVI} = \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red}} \quad \cdots (2)$$

ここで，R_{NIR}：近赤外域の反射率，R_{Green}：緑色域の反射率，R_{Red}：赤色域の反射率。

「にじのきらめき」は，「コシヒカリ」と比較して高温耐性，収量性，病害抵抗性（イネ縞葉枯病）に優れる水稲品種である。特に，稈長が「コシヒカリ」より 20cm 以上短く，倒伏しにくいため肥培管理が容易であり，収穫作業への支障も少ない。育成地における玄米収量は，標準施肥条件で約 10%，多肥

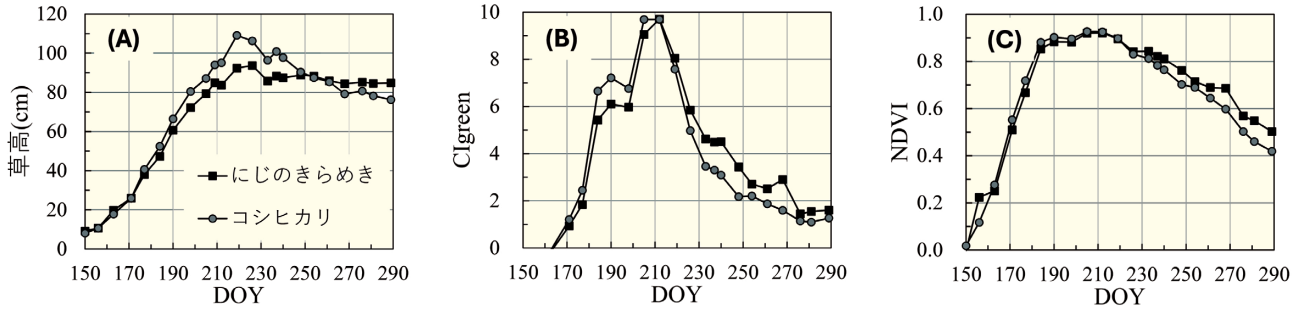

図 -8 「にじのきらめき」と「コシヒカリ」の草高・植生指数の時系列比較（2024 年）
A：SfM/MVS 解析による草高推定値，B：CIgreen（緑色クロロフィル指標），C：NDVI（正規化植生指数）

条件で約 30% の増収が認められている。さらに，玄米の外観品質は「コシヒカリ」より優れ，食味も同等の評価とされている (農研機構 2018)。

両品種の出穂日は，それぞれ 2024 年 7 月 30 日（DOY: 212）および 7 月 31 日（DOY: 213）であった。草高の時系列画像（図 -7 中段）によれば，出穂約 7 日前（DOY: 205）以降，「コシヒカリ」の草高は「にじのきらめき」よりも一貫して高く，出穂後 18 日（DOY: 240）までその差異は顕著であった。さらに，草高の 95 パーセンタイル値の比較結果（図 -8）からは, 7 月 2 日（DOY: 184）以降，両品種間の草高差が徐々に拡大し，出穂日付近で最大となる傾向が確認された。生殖成長期における草高の推移をみると，出穂後に「コシヒカリ」の草高は顕著に低下した。これは穂の倒伏に起因する。一方，「にじのきらめき」では，出穂後も草高はほぼ一定で推移し，わずかな減少にとどまった。印刷解像度の制約により紙面上の図から詳細な判読を行うことは困難であるが，RGB 画像（図 -7 左段）によれば，「にじのきらめき」の止葉は出穂後も垂直に立毛し, 穂を傘のように覆っている。一方，「コシヒカリ」の止葉は穂を十分に覆っておらず，時間の経過とともに穂が倒伏し, 全体的により黄化した画像 (9 月 4 日, DOY: 248）となっている (図 -7 左段)。このような形態的差異は，植生指数の時系列変化にも反映されており，出穂後 14 日 (8 月 13 日, DOY: 226) 頃から,「にじのきらめき」の CIgreen 値は「コシヒカリ」と比較して高い水準で推移していることが明らかとなった (図 -8B)。

多肥栽培試験として，高窒素栽培区（緑肥：ヘアリーベッチ）および慣行栽培区（化成肥料）に区分した試験圃場 (5 アール ×4 枚）を別途設置し，「にじのきらめき」「コシヒカリ」「北陸 193 号」「系統 A」の 4 品種・系統を栽培した。ドローンセンシング技術により，各品種・系統の草高および倒伏程度を比較した（図 -9)。その結果，慣行栽培区においては「にじのきらめき」の草高は「コシヒカリ」よりも低かった。一方，高窒素栽培区では，「コシヒカリ」が過剰な生育により倒伏していたのに対し，「にじのきらめき」は直立性を維持しており，慣行栽培区よりも草高が高く，生育が旺盛であることが確認された。また，新規需要米としての利用が期待されている品種・系統である「北陸 193 号」や「系統 A」は，慣行栽培区および高窒素栽培区のいずれにおいても，「にじのきらめき」および「コシヒカリ」と比較して生育が旺盛であり，倒伏も認められなかった。以上のように，ドローンセンシング技術を活用することで，慣行的あるいは多肥条件下で栽培された品種・系統における草高および倒伏の有無を，画像情報に基づいて客観的に比較・評価することが可能となる。

6. さいごに

筆者らは，ドローンセンシング技術という新たな視点から，水稲の育種学における高度に専門的な研究課題にアプローチしている。本技術は，単なる高精度な計測手段にとどまらず，植物の生育変化を客観的なデータとして記録し，鳥瞰的かつ時系列的な視点を通じて作物生育の新たな側面を理解・発見し，その魅力を他者と共有するための有効なツールとして位置づけられる。特に，生育に伴って変化する作物の形態的特徴や生育量を，時系列画像やグラフといった客観的な情報として可視化できる点は，ドローンセンシング技術ならではの利点である。これらのデータは，同一作物を研究対象とする異分野の専門家に対して，新たな仮説の構築や解析の契機となるインスピレーションを提供するものと考える。実際に本稿で紹介したドローンセンシング技術を用いた育種研究により同定された新たな遺伝子座は，稲の形態的特徴や生育量の時系列データから導かれたものである。この成果を起点として育種研究の本流へと展開することで，各遺伝子の機能解明を目的とした基礎研究や，DNA マーカーを用いた多収品種の育成を目指す応用研究へと発展させることができる。また，図 -9 に示したように，各品種の形態

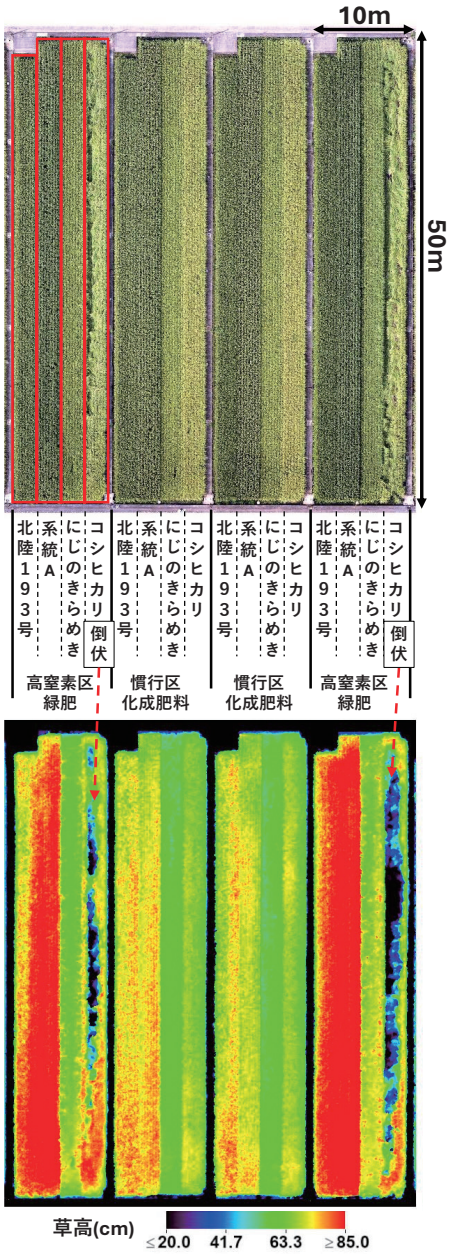

図 -9　高窒素区（緑肥）および慣行区（化成肥料）における品種間の倒伏程度および草高の違いをドローン画像解析により可視化。ドローン撮影日：2025 年 8 月 19 日

的な特徴を画像として可視化することで，育成品種の特性を実需者に視覚的に訴求することが可能となる。これは，言語による説明以上に強力な訴求力を持ち，品種の魅力を効果的に伝える手段となり得る。ドローンセンシング技術のこうした有効性を踏まえ，現在我々は，大豆，飼料用トウモロコシ，小麦を対象とする多様な研究者との連携を強化している。今後は，こうした分野横断型の共同研究の輪をさらに広げることにより，ドローンセンシング技術が農業研究分野における不可欠なツールとして定着することを期待している。

参考文献

秋山征夫・無田廣之・鈴木尚也・眞田康治 2020. 無人航空機の空撮画像を利用した深層学習によるオーチャードグラス個体選抜法の開発 . 育種学研究 22(1), 21-27.

Bongomin, O., Lamo, J., Guina, J. M., Okello, C., Ocen, G. G., Obura, M., ... and Ojok, S. 2024. UAV image acquisition and processing for high-throughput phenotyping in agricultural research and breeding programs. The Plant Phenome Journal 7(1).

Chen, R., Lu, H., Wang, Y., Tian, Q., Zhou, C., Wang, A., ... & Han, B. 2024. High-throughput UAV-based rice panicle detection and genetic mapping of heading-date-related traits. Frontiers in Plant Science, 15, 1327507.

da Silva, T. V. D. W., Gomes Pereira, L., and Oliveira, B. R. 2024. Assessing Geometric and Radiometric Accuracy of DJI P4 MS Imagery Processed with Agisoft Metashape for Shrubland Mapping. Remote Sensing 16(24), 4633.

David, E., Madec, S., Sadeghi-Tehran, P., Aasen, H., Zheng, B., Liu, S., ... & Guo, W. 2020. Global wheat head detection (GWHD) dataset: A large and diverse dataset of high-resolution RGB-labelled images to develop and benchmark wheat head detection methods. Plant Phenomics, 2020, 3521852.

Di Gennaro, S. F., Toscano, P., Gatti, M., Poni, S., Berton, A., and Matese, A. 2022. Spectral comparison of UAV-based hyper and multispectral cameras for precision viticulture. Remote sensing 14(3), 449.

Drone Okinawa 2025. ドローングリーンキーパー｜芝生管理にドローンを活用 . https://droneokinawa.jp/drone-green-keeper/. 2025 年 8 月 6 日確認 .

Fawcett, D., and Anderson, K. 2019. Investigating impacts of calibration methodology and irradiance variations on lightweight drone-based sensor derived surface reflectance products. In Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XXI Vol. 11149, pp. 101-114. SPIE.

Gitelson, A. A., Viña, A., Ciganda, V., Rundquist, D. C., and Arkebauer, T. J. 2005. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. Geophysical research letters 32(8).

井上吉雄・横山正樹 2017. 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 . 日本リモートセンシング学会誌 37(3), 224-235.

Nakano, H., Tanaka, R., Guan, S., and Ohdan, H. 2023. Predicting rice grain yield using normalized difference vegetation index from UAV and GreenSeeker. Crop and Environment 2(2), 59-65.

農研機構 2018.（研究成果）高温耐性に優れた多収の極良食味水稲新品種「にじのきらめき」. https://www.naro.go.jp/publicity_report/press/laboratory/carc/082656.html. 2025 年 11 月 2 日確認 .

Ogawa, D., Sakamoto, T., Tsunematsu, H., Kanno, N., Nonoue, Y., and Yonemaru, J. I. 2021. Haplotype analysis from unmanned aerial vehicle imagery of rice MAGIC population for the trait dissection of biomass and plant architecture. Journal of Experimental Botany 72(7), 2371-2382.

Ogawa, D., Sakamoto, T., Tsunematsu, H., Yamamoto, T., Kanno, N., Nonoue, Y., and Yonemaru, J. I. 2019. Surveillance of panicle positions by unmanned aerial vehicle to reveal morphological features of rice. PloS one 14(10), e0224386.

Ogawa, D., Sakamoto, T., Tsunematsu, H., Kanno, N., Nonoue, Y., and Yonemaru,

J. I. 2021. Remote-sensing-combined haplotype analysis using multi-parental advanced generation inter-cross lines reveals phenology QTLs for canopy height in rice. Frontiers in plant science 12, 715184.
大澤央・齋藤正博・長南友也・林怜史・八木岡敦・中村卓司・趙元在 2024. 空撮画像を活用したスイートコーン雄穂の開花状況検出技術の開発 . 農業食料工学会誌 , 86(1), 39-43.
Pix4D 2025. 芝生管理：サッカー場のドローン活用 . https://www.pix4d.com/jp/blog/turf-management-football-pitch/. 2025 年 8 月 6 日確認 .
Rouse Jr, J. W., Haas, R. H., Deering, D. W., Schell, J. A., and Harlan, J. C. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation (No. E75-10354).
坂本利弘・岩崎亘典・石塚直樹 2019. 小型 GNSS 受信機および測位演算プログラムパッケージ「RTKLIB」による対空標識の簡易・高精度測位手法に関する事例研究 . 日本リモートセンシング学会誌 39(2), 123-132.
坂本利弘・小川大輔 2022. 近接リモートセンシングによるコマツナの生育調査方法の検討 . 日本リモートセンシング学会誌 42(4), 310-321.
Sakamoto, T., Ogawa, D., Hiura, S., and Iwasaki, N. 2022. Alternative procedure to improve the positioning accuracy of orthomosaic images acquired with agisoft metashape and DJI P4 multispectral for crop growth observation. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 88(5), 323-332.
Tanaka, T. S. T., Wang, S., Jørgensen, J. R., Gentili, M., Vidal, A. Z., Mortensen, A. K., ... and Gislum, R. 2024. Review of crop phenotyping in field plot experiments using UAV-mounted sensors and algorithms. Drones 8(6), 212.
Taniguchi, S., Sakamoto, T., Imase, R., Nonoue, Y., Tsunematsu, H., Goto, A., ... and Ogawa, D. 2022. Prediction of heading date, culm length, and biomass from canopy-height-related parameters derived from time-series UAV observations of rice. Frontiers in Plant Science 13, 998803.
郭威・Haozhou Wang・Tang Li・西田えり佳・加藤洋一郎・深野祐也 2023. ドローンと AI で規格外野菜を減らす ―畑全個体のサイズを自動計測し，最適な収穫日を推定 ―. https://www.a.u-tokyo.ac.jp/topics/topics_20230908-1.html, 2025 年 8 月 6 日確認 .
ヤンマー株式会社 2017. ヤンマーとコニカミノルタ，農業分野での新会社「ファームアイ株式会社」を設立，ヤンマー公式サイト，https://www.yanmar.com/jp/agri/news/2017/09/29/34571.html. 2025 年 8 月 16 日確認.