



この「応用編」では、「基礎編」の各節で取り上げた先端技術が農業の現場でどのように活用されているのかを紹介します。全体を「作業の自動化」と「データの利活用」の2つのテーマで大別しています。これは、そもそも農業という仕事が、まずさまざまな局面でさまざまな知識や経験から判断がなされ、そしてそれらに基づいて実際の農作業が行われるという

流れになっているからです。「作業の自動化」では農作業ロボットや水管理など現場での農作業に関することを、そして「データの利活用」では営農支援システムや衛星リモートセンシングなどデータの取り扱いについて解説しています。これを念頭において読んでいくことが、全体像の把握につながります。



人間の労力を軽減する「自動操舵」とは？

基礎編・第2節でも述べたように、スマート農業では完全に自律化した車両ロボットの開発が進められています。逆にいえば、こうした人の手に頼ることがない完成されたロボット車両は、まだ実用化されていないといえます。

このあとの応用編・第3節でくわしく取り上げますが、トラクターや田植え機、コンバインなどのロボット化の研究は、3つのレベルに分けて進められています。最上位のレベル3は、人間が遠隔監視を行い、圃場間の移動から農作業までを自律的に行うことを目指しており、これが完全自律化された車両ロボットにあたります。レベル2は、人間が近くで目視監視を行いながら自動走行が可能なものの研究です。

そしてレベル1は、GNSSなどによって自動的に操舵が行われ、乗車している人間がほとんど運転することなく、目標の経路を正確に走行するもので、「オートガイダンスシステム」とも呼ばれています(写真1)。

人間が乗るのだから、たいした労力の軽減にはならないのではないかとされるかもしれません。しかし近年、畑や水田は大規模化していて、そこで人がトラクターなどを長時間集中して操舵するのは、大きな労力とな

ります。トラクターが等間隔の作業列(作物列など)を維持しながら正確に直進することが自動的にできれば、重複幅を削減して作業効率を向上させ、長時間の集中から解放されて重労働を軽減することへとつながります。こうしたメリットがある「自動操舵システム」について、ご紹介します。

自動操舵システムを構成する4つの機器

GPS (GNSS) 衛星からの位置情報による自動操舵は「GPS (GNSS) オートガイダンス」とも呼ばれ、以下の機器から構成されます。

- GPS (GNSS) アンテナ
- システム本体
- オートステアリング
- 車体傾きセンサ
- スマートフォン

GPS (GNSS) アンテナはGPS (GNSS) 衛星の位置情報を得るためのもので、オートステアリングはその位置情報にもとづいて、設定された経路に合わせて車体の進行方向を自動的に操舵するシステムです。また、不整地走行時の車体の傾きは直進走行をする上で誤動作の原因となるので、車体傾きセンサで検知し、これを補正します(写真2、3)。

写真2 自動操舵が可能なコンバインの例

クボタ製 WRH1200A2



写真3 GPS (GNSS) アンテナ

WRH1200A2のキャビン頂部に装備



写真1 自動操舵の一例

作業中でも、操縦者は手放し運転ができる。



自動操舵による実際の作業手順

GPS (GNSS) ガイダンスによる自動操舵の手順の一例を見てみましょう。北海道河東郡音更町の三浦農場で行われた、自動操舵システムのトラクターによる耕耘作業で、全体的な流れは以下のようになっています。

- (1) 圃場登録：コンピュータシステムに圃場の形状をおぼえさせる。
- (2) 作業内容のセッティング：作業機の作業幅をインプットする。
- (3) 実作業：作業を実施する。

圃場登録と作業内容のセッティング

圃場登録は、作業を行う圃場を記憶させて、それをシステムに登録する作業です。

登録はディスプレイで行います。自動操舵システムは、先にあげた機器を後付けで装備することができるタイプもあるので、すでに保有している通常のトラクターなどに自動操舵機能を持たせることも可能となっています(写真4)。

作業を行う新しい圃場を登録する際には、圃場名をつけます。圃場名は、あとで呼び出したりするときのために、わかりやすい名前を付けたほうがいいでしょう(写真5～7)。

写真4 圃場登録は、キャビン内のディスプレイ上で行う



写真5 メニューを開く



写真6 圃場の登録を行う



写真7 キーボード画面で圃場の名前を記入

あとで呼び出すこともあるので、わかりやすい名前を付ける。

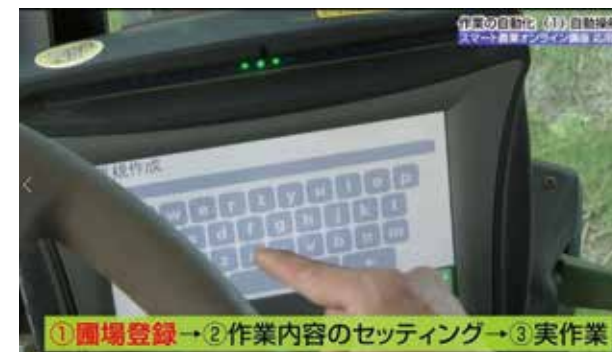


写真 8・9 圃場の外周に沿ってトラクターを走らせる

圃場の位置・形状を記憶させるためには、圃場の外周に沿ってトラクターを走らせる。地図情報を作成する際には、その軌跡からマップを作成することが一般的。

写真 8

作業の自動化 (1) 自動操舵
スマート農業オンライン講座 応用編



写真 9

作業の自動化 (1) 自動操舵
スマート農業オンライン講座 応用編



圃場登録はこれで終わりではありません。トラクターのエンジンをかけて、実際に圃場の周囲を走行し、システムに圃場の位置・形状を記憶させます。

三浦農場のこの圃場は四角形なので、4つの辺を走行します(写真8～10)。

圃場登録が終わったあとは、作業内容をセッティングします。今回はトラクターによる耕耘を行うため、作業機の作業幅をディスプレイを使ってインプットします。

これで圃場登録と作業内容のセッティングが終了しました。このあとは実作業となります。

写真 10 圃場の形状を記憶させる

圃場の位置・形状を記憶させる段階では、人が操縦する必要がある。



実作業

実作業中において、直線の走行時は人間の操縦は必要ありません。トラクターは自律的にまっすぐな軌跡で耕耘作業を行います(写真11～15)。

自動操舵システムの導入によって、トラクターの運転が未熟な従業員でも高精度で作業を行うことができるため人員の有効活用ができ、最終的に経営面積の拡大も期待できます。

写真11・12 実際の作業に移る

作業機の作業幅のセッティングを行った後、実際の作業に移る。



写真11



写真12

写真13・14 折り返して作業を継続。



写真13



写真14

写真15 トラクターの軌跡

重複することなく、まっすぐな軌跡で耕耘作業を行っている。



((人)) 有人監視下で作業を行う農作業ロボット

応用編・第1節では、人間が乗車して自動走行を行う「自動操舵システム」をご紹介しました。第2節では、人間の監視下で無人のロボット車両が作業を行う「農作業ロボット」の実際を取り上げます。

これは第1節でも少し触れた、ロボット化における段階の「レベル2」に相当するものです。現在の法規制下でレベル2の農作業ロボットを運用するためには、圃場の外にいる監視者の目の届く範囲で農作業ロボットを運用するか、あるいは監視者が農作業ロボットと協調して作業を行う有人トラクターなどに乗車し、並走もしくは追走して監視することとなっています(くわしくは応用編・第3節で取り上げます)。

今回は、農作業ロボットの運用において、作業計画から作業の実施がどのような流れで行われるのかを、現場での実例をもとにご紹介します。

((人)) 作業計画作成——例：大豆の栽培

大豆を栽培する作業体系の一例として、まず慣行ではパワーハローなどによる整地を行い、その後に播種作業を行います。整地は2回行います。

一方、農作業ロボットによる作業体系は、1回目の整地作業を行った後、2回目の整地作業をしながら、並行して有人トラクターが播種を行います(図1)。

((人)) 整地作業のシミュレート

慣行の場合

今まで行われている慣行の手順を見てみましょう(図2)。まず、パワーハローを使って2回の整地が行われます。

そして播種作業を行います。その途中で天候が悪化し、雨が降ってきたとします。この段階で播種作業は中断し、整地後の雨による水が引くの待たなければなりません。

図1 整地と播種の工程



農作業ロボットによる作業体系では、2回目の整地作業と同時に、有人トラクターが播種作業を行う。

図2 通常の慣行の場合の作業体系

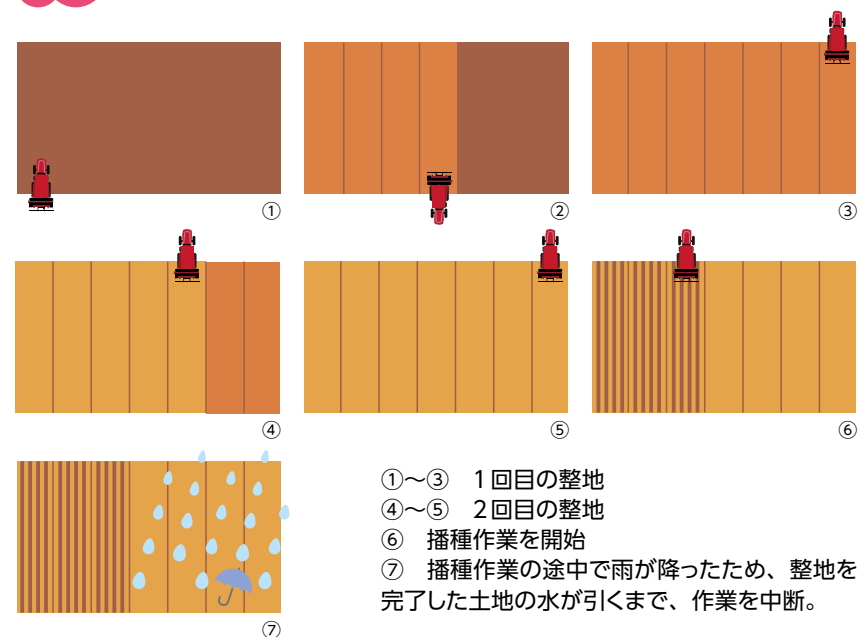
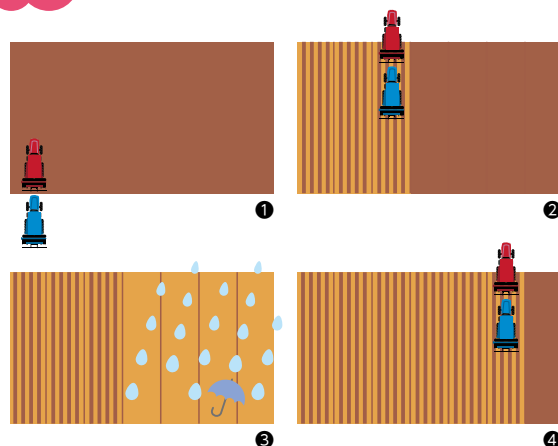


図3 ロボットトラクターの場合の作業体系



①～② 最初の整地の後、ロボットトラクターが2回目の整地を行い、その後ろを有人トラクターが追走して播種作業を行う。

③：作業の途中での降雨。

④：必要最低限の整地しか行っておらず、畑が水を含むのが妨げられているため、円滑に作業を再開できる。

ロボットトラクターの場合

ロボットトラクターによる作業を見てみましょう(図3)。まず、ディスクハローなどによって1回目の整地を行います。

そして次に、2回目の整地作業を行う無人のロボットトラクターに追走する形で有人トラクターが播種作業を行います。この段階で雨が降ってきても、必要部分のところしか整地が完成していないので、畑に水が含まれるのが妨げられ、作業を再開することが可能となります。

従来の慣行では、すべての作業を人間がやらなければならない、そして日数もかかります。これに対し、ロボットトラクターを導入することで、2回目の整地と播種を一度に1人の人間で行うことができます。つまり、人員と日数の削減に成功していることになり、さらに突然の降雨などの突発的な事象についても柔軟に対応できる可能性が高くなるのです。

ロボットトラクターによる実際の作業

では、無人の農作業ロボット(ロボットトラクター)で、どのような作業が行われるのでしょうか。一例として、北海道河東郡音更町三浦農場で行われた実際の作業手順を見てみましょう(写真1)。

写真1 有人トラクター(右)とロボットトラクター(左)

ロボットトラクターのあとを、監視者が乗車した有人トラクターが追走して播種作業を行う。



写真2 GPS (GNSS) の状況の確認

写真3



スマートフォンから、GPS (GNSS) の補正情報をシステム側に送信する。RTK測位などを使用する場合、位置情報はスマートフォンで受け取ることができる。



写真4 RTK測位のように

GPS (GNSS) 受信

まず、「GPS (GNSS) 受信」を行います。これはGNSSの位置情報および補正情報をロボットトラクターへ送る作業です(写真2、3)。

写真4では、RTK測位によって正確な位置が緯度・経度であらわされています。この設定の後、確認のため時速4キロほどで走行する必要があります。RTK測位は、短時間で位置計測ができるので、常に移動している農作業ロボットの位置計測に最適な計測方法といえます。

圃場登録

圃場登録を行います。ロボットトラクターがいる場所が表示され、圃場の登録のために畑を一周します(写真5～8)。



写真5
メニューを開き…



写真6
圃場の登録を行う



写真7
トラクターの場所が表示される



写真8
畑を一周することで、圃場の登録が完了する

作業領域登録

GNSSの位置計測情報をロボットトラクターに送信し、作業を行う圃場の登録が完了したあとは、行う作業についての設定を行います。ここではスタートとゴールの位置を設定して登録します(写真9)。

作業機の種類と経路の作成

どの作業機を使うかの選択を行い、細かな作業経路を作成します。下の写真では、作業機としてサブソイラを選択しています(写真10)。

作業経路の作成では、旋回方法や速度など、作業内容や圃場の状態などを勘案して、細かく設定できます(写真11、12)。

これにより、「作業マップ」が完成したことになり、このマップにもとづいて、ロボットトラクターは作業を行います。

写真9
「S(スタート)」と「G(ゴール)」を指定する



写真10
作業機としてサブソイラを選択



写真11
作業経路を作成



写真12
作業内容を設定



実際の作業

作業を始めるときは、人間が有人トラクターに乗り、リモコンでロボットトラクターにスタート命令を出します。これによって、ロボットトラクターが整地作業を始め、その後ろから有人トラクターが播種作業を実施します(写真13、14)。

播種作業は播種時期が決まっていますので、天候に対応しやすく、人員や日数を省力化できる農作業ロボットは、農家の人々が農作業を円滑に進める上で重要な農業機器になると期待されています。

写真13 無人のロボットトラクターが整地作業を行う後ろから、播種を行う有人トラクターが追走する



写真14 手前がロボットトラクター、奥が播種作業中の有人トラクター



「遠隔監視ロボット農機」とは何か？

スマート農業を行う上で欠かせない要素である車両ロボット、いわゆる「ロボット農機」は、現在レベル1、レベル2、レベル3の3つに区分されています(図1)。

レベル1は「GNSSオートステアリング」によって、人間が手放してトラクターやコンバインなどの農機を運転するものです(応用編・第1節参照)。そしてレベル2は、人間が乗らない無人農機ですが、ロボット農機の近くで人が目視監視をして安全を確保することが前提となっています(応用編・第2節参照)。

これに対してレベル3では、近くで目視監視する必要がなく、離れたところにある監視センターから監視者1人がモニターを見ながら複数のロボット農機の作業を監視できるようになります(図2)。

もう1つの特徴は、圃場間の移動です。つまり、農機置場から自動で出て圃場に向かい、さらにほかの圃場にも移動して、最後に農機置き場に戻ってくるところまでを遠隔監視で行えるようになります。

これらのことから、遠隔監視ロボット農機とは、「離れたところから監視することで、農作業や、圃場間の移動が可能なロボット農機」と定義することができます。

遠隔監視ロボット農機の現状と問題点

とはいえ、レベル3の遠隔監視ロボット農機は、まだ実用化されていません。それにはいくつかの理由があります。まず「技術的問題」として、以下の課題をクリアしなければなりません。

- 低遅延の無線伝送
- 高速大容量の通信

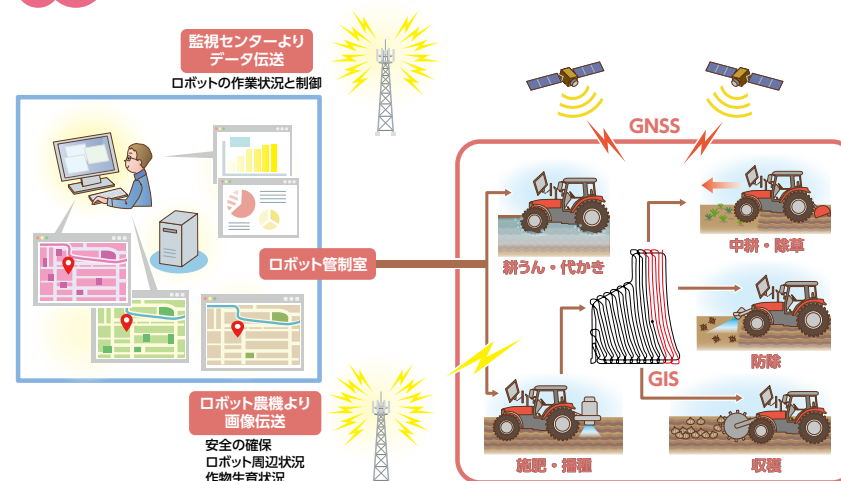
電波を使って離れたところから監視するわけですから、ロボット農機からの映像が遅れるようでは、障害物や人にぶつかる可能性が高くなって非常に危険です。そもそも映像情報はデータ容量が大きく、その大容量の情報を高速で送れなければならないのです。仮に実用化されたとしても、通

図1 農作業のロボット化のロードマップ



レベル1は、現在多くの農業従事者が利用しており、レベル2も2018年には商品化され、各社から販売されている。特にレベル2は、①労働力不足の大幅改善、②作業精度・作業能率の向上、③農業従事者が他の業務に時間を割くことができるなどのメリットをもたらしているが、レベル3はさらなる効率化・省力化が期待できる。

図2 遠隔監視ロボット農機の全体イメージ



監視センターからの遠隔監視によって、複数の農機のさまざまな作業を制御することができ、農機周辺の情報などはロボット農機から伝送される。ロボット農機はGNSS衛星からの位置情報によって自分の位置を把握して、図のように圃場を走行する。GISは「地理情報システム」といい、地理的な情報が地図に反映される。

信が混雑して、遅延したり高速性が低下したりする可能性があります。このため、安定した「低遅延・高速大容量通信」の実現が必須といえます。

もう1つは「法制上の問題」です。遠隔監視ロボット農機は圃場間の移動を行えることが大きな特徴ですが、現在の道路交通法では無人の車両が一般の公道を走行することを禁止しています。このため、圃場を結ぶ一般道を遠隔監視ロボット農機が無人で移動することができません。

こうした技術的・法的問題があるため、遠隔監視ロボット農機は、まだ実用化にいたっていません。

実証実験①

—— 遠隔監視ロボットトラクターの安全策

遠隔監視ロボット農機の現在の到達点を、いくつかの実証実験から見てみましょう。

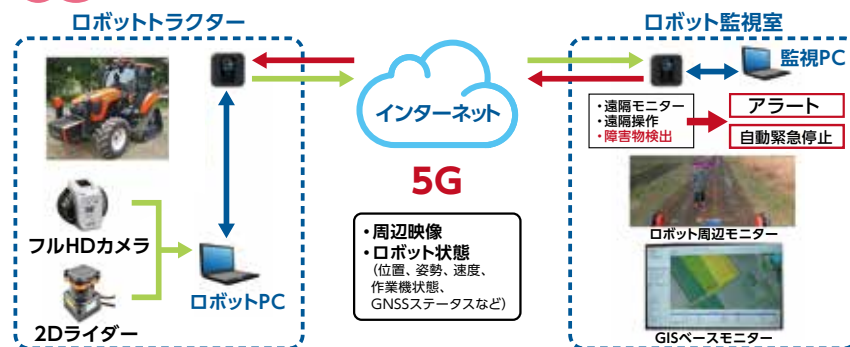
通常、遠隔監視ロボット農機には、高い精度で位置を計測できる装置の「RTK-GNSS受信機」と、車体の傾き(姿勢)を測るセンサの「IMU」が必ず必要となりますが、さらに農機周辺を認識するセンサも重要です。

現在、北海道大学(以下、北大)とNTTグループは、レベル3の遠隔監視ロボット農機の安全性確保を目標として研究開発を進めています。この実証車両にはRTK-GNSSとIMUの他に、マシンビジョンとしての高解像度の「フルHDカメラ」と、光によって障害物を検知して距離を測る「2Dライダー(LiDAR)」が、周辺の環境を認識する安全センサとして装備されています。

このロボット農機の遠隔監視の全体像は図3のとおりです。データは5G通信によってインターネットのクラウドを介してやり取りされます。フルHDカメラによって障害物を検知し、AI(人工知能)が判断してアラートを出し、危険が増大したときはAIが自動的に緊急停止させます。

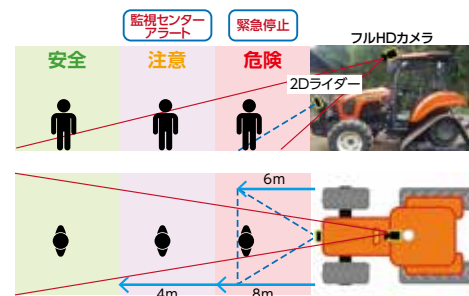
伝送の遅延・タイムラグが大きくなって対応が遅れることもありえますが、そのときは2Dライダーで検知してロボット農機側が処理して、自動的に停止するしくみとなっています。いわば、安全対策が二重、三重に施されているわけです(図4、写真1、2)。

図3 北海道大学とNTTグループによる遠隔監視の全体像



ロボット監視室では農機から送られてきた映像を監視者が確認。AI(人工知能)が障害物を察知したときはアラートが出され、必要な場合は自動緊急停止させる。2Dライダーはロボット農機側のコンピュータが処理するしくみとなっている。

図4 障害物検出システムの多層化



この実証車両では、12m以上離れたところは安全域として設定。12m以内になったら、障害物をAIが検出し、監視センターのアラートを鳴らす。さらに近づいて8m以内となると緊急停止となるが、伝送遅延などによって衝突する危険が増大したときは、2Dライダーが検出し、ロボット農機側のコンピュータの判断で緊急停止する。

写真1 フルHDカメラによる前方の映像



左下には、アラート用パトライトがある。

写真2 路上に人を検知



AIが判断してパトライトを点灯。さらに近づくと、自動的に停止する。

一方、遠隔監視ロボットトラクターに搭載されている障害物検知用のフルHDカメラは、障害物検知のみならず他の用途にも利用できます。たとえば、作物の生育や病害虫の状態、あるいは作業機が正常に動作しているかなどを遠隔地で監視者が確認したり映像を記録したりすることができます。

実証試験②——より遠距離から複数を監視する

さらに北大は、監視センターの1人が複数のロボット農機を監視することが可能かどうかの実証実験を行っています。この実験では、北海道岩見沢市にある監視センターから37km離れた北大の研究農場で2台、7km離れたところの西谷内農場で2台、計4台のロボット農機の制御・監視を行いました(写真3、4)。

この実験では、「ヤンマー社ホイール型トラクター」と「ヤンマー社クローラ型トラクター」(以上、北大)、「クボタ社ホイール型トラクター」と「クボタ社クローラ型トラクター」(以上、西谷内農場)の2社の農機が異なる作業を行う設定で実施されました。

写真4の中央のモニターは「GISモニター」で、現在のロボット農機の位置や速度、作業内容に関するデータを地図上に表示します。

この実験では、遠距離から複数のロボット農機を監視することができました。ただし、3人が見ていることからわかるように、1人の監視者による4台の監視・制御は、やはり困難です。

将来的には、監視者がトレーニングを積むことで、もっと多くのロボット農機を監視できるようになるでしょう。しかし、それでもAIによる認識と緊急停止は、サポート機能として不可欠といえます。

現在、北大では、さらに遠距離からの試験を行っています。北海道浦臼町や石川県鳳珠郡にある果樹園、高知県安芸郡の柚子農園などの実際の農園で作業を行う電動ロボットを北大の監視センターから遠隔監視・制御する実験です(図5)。このように遠隔地からの監視のもとで複数のロボット農機がさまざまな作業を行う農業のことを「リモート農業」といいます。このリモート農業の実証は2022年度から始まっており、現在検証作業が

写真3 ロボット監視室と実証フィールド



実証試験では、監視センターから37km離れた北大と、7km離れた岩見沢西谷内農場の合計4台の遠隔監視ロボット農機を制御・監視した。

写真4 監視センターのようす



真ん中の人物のみが監視作業を行った。モニターは左側が北大研究農場の2台。右側が西谷内農場の2台を示す。

行われています。

遠隔監視ロボット農機がもたらす将来像

もし、レベル3の遠隔監視ロボット農機によるリモート農業が普及すると、「新しいビジネスモデル」が確立される可能性が高まります。たとえば近年、農業従事者の高齢化が進んでいますが、こうした高齢の従事者たちに代わって「作業の請負・シェアリング」を行うビジネスが発展し、農業従事者の仕事を補助することも可能となるかもしれません。農業の世界に新規参入する企業が農業に変革をもたらすかもしれないのです。

また、高齢化が進んで管理が困難になった農地が遊休地や耕作放棄地になって荒れ地となってしまうと、景観や防災、環境維持の面でも問題が出てきます。そこで企業がリモート農業によって圃場の管理を行うことで、こうした問題を解決する可能性もあります。

研究開発の流れとしては、将来的にはロボット農機をもっと小型化してAI機能を持たせ、以下を実現することを目指しています。

- より自律的なロボット農機によるさらなる省力化。
- AI機能を持ったロボット自身の熟練技術の体得。
- それによるリモート農業の実現。

これにより、以下のことが期待できます。

- ★ 距離的に制限のない遠距離から、人間に代わって農業を行うことで、人手不足の現状に新しい農業の形を提示する。
- ★ 距離的制限がないので、海外のロボット農機を制御することが可能となり、世界的な食料生産体制の安定につながる。
- ★ 日本の技術が世界の食料生産において大きな貢献ができる。

遠隔監視ロボット農機の研究開発は、高齢化が進む日本の農業に即した新しい農業のあり方を提示し、ひいては世界の食料事情にも大きな影響を与える可能性を秘めているといえるでしょう。

図5 リモート農業の実証紹介



実証試験では、北海道浦臼町の「鶴沼ワイナリー」、石川県鳳珠郡にある「能登ヴィンヤード」の2つのぶどう園と、高知県安芸郡北川村の「土佐北川農園」の柚子畑という、実際の農園の協力下で実施。北大の監視センターから鳳珠郡まで700km、安芸郡の農場までは1240km離れている。

意外に「時間」と「労力」を使う水管理

水稻栽培ではさまざまな作業が伴い、それぞれに時間がかかります。なかでも水田における灌漑・排水管理、いわゆる「水管理」は、総労働時間の3割を占めるとされています。

しかも、他の作業の労働時間が少なくなる傾向にあるのに対して、水管理にかかる時間はそれほど削減されていません。田植作業は機械化が進み、除草作業は新たな薬剤や散布方法が普及しているのに、水管理はほとんど機械化されておらず、引き続き人手に頼っているからです(図1)。わざわざ水田に出向いて状態を確認する“水回り”が行われているケースも多いのではないのでしょうか。

また、^わ早生や^せ中生、^{なか}晩生など品質や栽培方法ごとにさまざまな作付け体系の水田があり、それに合わせた水管理をしなければなりません、農業人口は減少しており、こうした複雑化した水管理を少人数で行わなければなりません(図2)。

現在の自動給水装置の限界

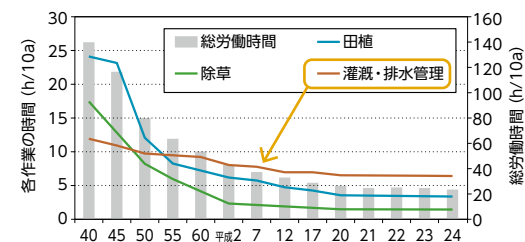
日本の用水路は、水路が露出していて目で見えることができる「開水路」と、地中に埋められたパイプラインで水を送る「管水路」に大別され、現在整備されているもののおよそ7割が、管理が大変な管水路です。

給排水は、開水路ではゲート状のしくみによって、またパイプラインを埋設する管水路の場合はバルブで行われ、それぞれのタイプに合わせた自動給水装置が市販されています。開水路用に自動化されたゲート状の自動給水装置のほか、管水路ではフロート式センサを持った給水装置(水位が上がるとフロートが上昇してスイッチが入って給水が止まる)や、時間を設定して一定の間隔で灌漑を行えるタイマー式もあります(写真1)。

これらはあくまで「一定の水位を保つための自動化」であって、精密な水深・水位の管理を目的としたものではありません。すなわち、現在の自動給水装置は完全自動ではなく、あくまで「セミオート(半自動)」のレベルといえます。

図1 水管理に要する時間

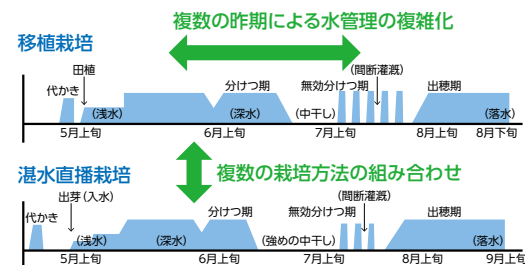
総労働時間の約3割を占める！



水稻栽培では、田植や除草作業にかかる労働時間が年々削減されているが、水管理の労働時間は横ばい状態が続いている。

図2 栽培方法によって異なる水管理の一例

水管理は
水稻耕作の生命線！



あらかじめ育てた苗を水田に植える「移植栽培」と、水を満たした水田に種を直接まく「湛水直播栽培」とでは、図のように水の管理方法が異なっている。異なる栽培方法の水田の水管理を少人数で行うことは困難といえる。

写真1 自動給水装置の例



開水路で使用される自動給水装置。自動的にゲートを閉めて止水する。



管水路フロート式センサによる止水。手前の黒い筒状のものがフロート。



タイマー式の自動給水装置。

ICTを用いた水管理とは？

それでは完全に自動化された、いわばスマート農業に適した水管理とはどのようなものなのでしょうか。それは一言でいえば、「ICT（情報通信技術）を利用した水管理」です（図3）。

最新のICT水管理システムは、クラウドを介して情報のやり取りをします。たとえば給水バルブの水位センサがモニタリングした数値をクラウドにあげ、サーバにある「サーバソフト」を使うことで、複雑な水管理が可能となります。

一方、農業従事者はスマートフォンやタブレット、パソコンでアクセスすることで、いつでも、どこでも現状を把握できますし、「水位を変えたい」と思えばスマートフォンを使って制御命令を出し、即座に水位を上げること、下げることもできるようになります（写真2）。

ICTを利用する水管理でもたらされるもの

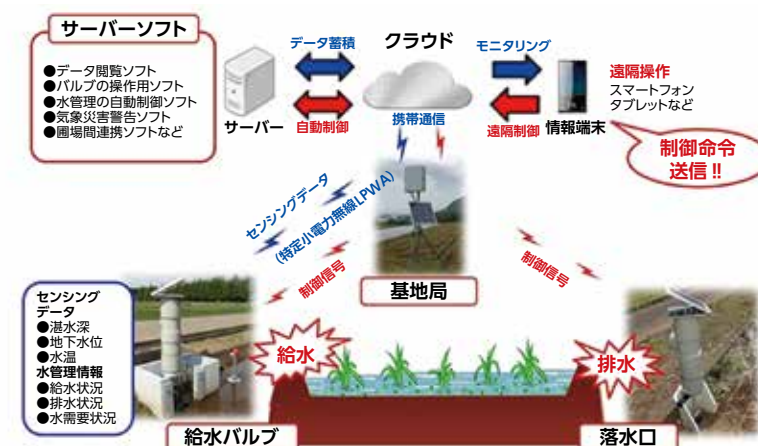
従来の自動給水装置は、用水路に設置される給水装置のみによる自動化でしたが、ICT水管理システムは、クラウドを介して全体が情報システム化されたものとなり、それによって①自動化、②デジタル化、③スマート化の3つが可能となります。

①の「自動化」は、さきほど述べたように、従来のセミオートではなく完全な自動化によって複雑な水管理を行えるということです。

②の「デジタル化」とは、センサーが検知した正確な数値によって水管理が行えることのほかに、以前この時期に水位を何cmにしたのか、その期間はどれくらいだったのかといった履歴を記録として残すことができるようになるということです。今までは熟練者の経験や“勘”に頼っていた水管理を実証データに基づいて管理できるようになり、さらに現在普及しつつある「営農支援システム」の有効活用にもつながります（応用編・第5節）。

そして、デジタル化によって、③「スマート化」も可能になります。水温や気象情報などのデータとの連携が可能となり、異なるデータとのク

図3 ICTを活用した水管理システムの概要



- センサで水位・水温等をモニタリングし、クラウドにデータを蓄積
- クラウド上のさまざまなソフトを使って複雑な水管理を実現

水田の水位や水温、給水の状況などのセンシングデータ（計測データ）や、給排水の制御信号、スマホなどによる遠隔操作は、クラウドを介してやり取りされる。

写真2 スマホによる遠隔操作



情報の確認だけでなく、スマホなどを使って遠隔で水管理を行うことも可能となる。

ロスチェックができるようになるということです。前ページの図3を見ると、サーバーにはさまざまなデータを扱うソフトがあり、各種の情報と照らし合わせての判断や決定が可能となります。たとえば、今後1週間の天候や寒暖の差に関する情報を過去の水管理の履歴と連携させて検討することで、最適な水管理を行うことができるようになるわけです(写真3)。

このため、まずは情報のデジタル化を図り、その情報をサーバーにどんどん蓄積して、最終的に水管理のスマート化につなげていくことが重要といえるでしょう。

市販されているシステムの導入のポイント

ICTを活用した水管理システムは、用水路の形態や給水口の形状などニーズに合わせたものが、いくつかのメーカーから市販化されています(写真4)。

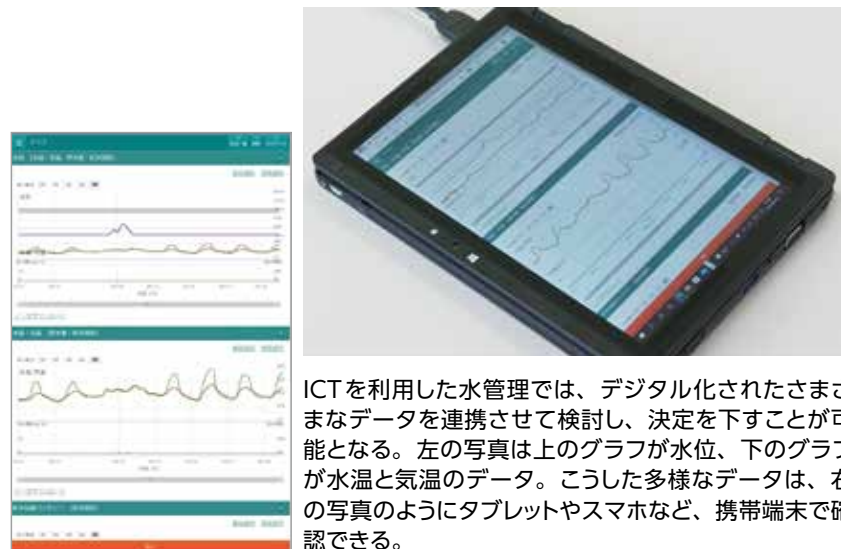
ニーズに合ったものを選ぶことは当然ですが、先にも述べたように「水深や給排水の水管理におけるデジタル化」に対応し、最終的に「水管理のスマート化」を実現できるシステムを選ぶことが重要といえます。

複雑で高度な水管理とは

まず、「高温障害対策」と「低温障害対策」です。前者では水田を湿潤状態に保つ飽水管理が行われ、後者では幼穂の生育に合わせて水位を調節して幼穂を寒さから守る深水管理が行われます。両方とも頻繁な給排水が必要ですが、ICTを活用した水管理システムでは、これらを自動的に行うことができます。

また、人間が真っ暗な夜間に水管理を行うことは非常に困難を伴いますが、こうした「夜間灌漑」においても遠隔から精密な水管理を行うことができます。また干ばつのときなどに行う「超節水灌漑」においても、水の無駄を発生させずに最適な配分を行う「ローテーション灌漑」を自動的に行うことが可能となります。これらは非常に細やかで複雑な監視や制御を常に行う必要がありますが、ICTを活用した水管理システムならこうした

写真3 ICTを利用した水管理



ICTを利用した水管理では、デジタル化されたさまざまなデータを連携させて検討し、決定を下すことが可能となる。左の写真は上のグラフが水位、下のグラフが水温と気温のデータ。こうした多様なデータは、右の写真のようにタブレットやスマホなど、携帯端末で確認できる。

写真4 圃場水管理システムの例

(株)クボタケミックスが発売している、圃場水管理システム「WATARAS (ワタラス)」。

データや制御のやり取りをクラウドサーバーを介して行い、スマホやタブレットなどで確認や制御を行うことも可能となっている。この他にも各社がさまざまなICTを利用した水管理システムを市販しているが、デジタル化とスマート化に対応したものを選ぶのがポイント。



高度な管理を任せることができるのです。

実証試験の結果から見た実際の効果

では、ICTを活用した水管理システムによる具体的な効果を実証試験のデータで見てみましょう(図4)。

まず「水管理における労力」では、およそ8割削減され、大幅な省力化を達成しました。次に「水稻収量」、つまり収穫量ですが、これは6%アップとなりました。

もちろんICTを導入しなくても、きちんと水管理を行えばそれなりの収量は期待できますが、経営規模が大きな農家の場合は水管理が十分に行えない傾向にあります。つまり、収穫高の面からすれば、ICT水管理システムは大規模農家において特に有効であるといえます。実証試験結果を見ると、収量の面でICT水管理システムの導入は、「増収効果が期待できる」というよりも、「減収抑制効果が期待できる」といい換えることができます。

ICT水管理システムの将来と現在の課題

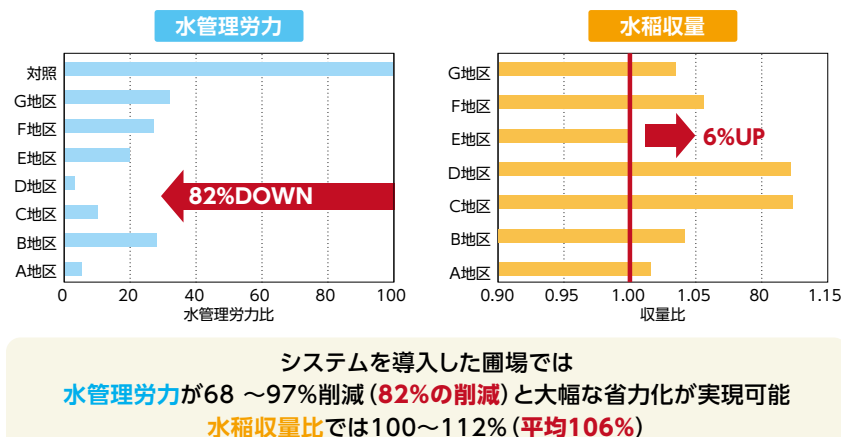
今後は、ICT水管理システムのスマート化が進むことが予想されます。品種や移植日やその地点を登録し、それらと作物の発育モデルを連携させることで、気象状況や作物の生育レベルに合わせた水管理を自動で適時行うことが可能となります。

また、「営農支援システム」と連携させることで、代かきや防除などの計画に応じた水管理が自動的に行えるようになるので、農業経営全体としても大きな省力化・効率化につながります。

ただし、ICT水管理システムには、「ICTリテラシーの向上」や「導入費の低コスト化」などの課題も存在していて、それらの解決策も検討されています(図5)。

今後、ICT水管理システムの導入は、農作業のみならず、営農全体の省力化・効率化に大きく貢献するものといえるでしょう。

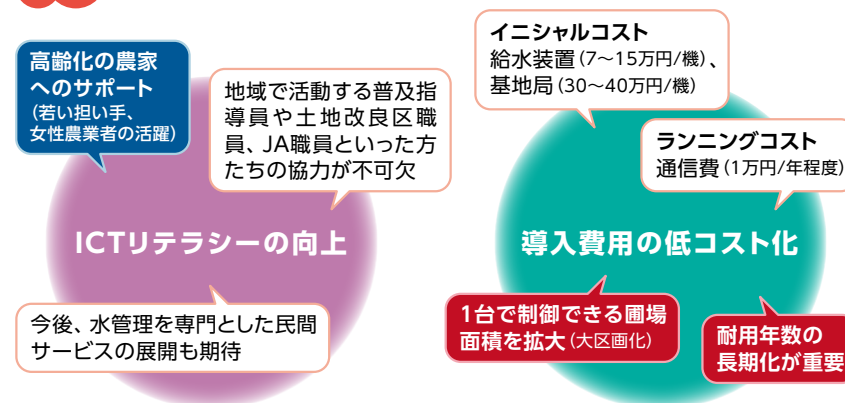
図4 ICT水管理システムの実証試験結果



鈴木ら(2018)、農業農村工学会誌、86(12)、17～20

実証試験では、今まで通りの水管理を行う対照地区と、ICT水管理システムを実施したA～Gの7地区を比較した。システムを導入したところでは、水管理労力が82%削減され、水稻収量が6%アップした。

図5 水管理システム導入の課題



高齢者にとってICTを使いこなすことは非常に困難なので、若い人などのサポートが必要。将来的にはICT水管理の請負事業者によるサポートも期待できる。また、低コスト化は簡単には実現できないが、1台でより広範囲をカバーできるようにしたり、システムの耐用年数を伸ばすことで低コスト化を図る方法が考えられる。

「データによる農業」の発展

現在、日本の食料自給率は非常に低い状態となっています。にもかかわらず、農業従事者の減少と高齢化が進み、さらには全国的に農村部も含めた地域経済は疲弊しつつあります。これらの課題を解決する1つの対策として今、推進されているのがスマート農業です。スマート農業は高度なセンシング(観測)技術、自動制御、AI(人工知能)、特にICT(情報通信技術)を使って、農業の合理化・省力化を進めようとするものです(図1)。

人類の長い歴史を見てみると、農業は「農作業」と「営農判断」から成り立っています。「農作業」は人力のほかに牛・馬などの畜力が行い、やがてトラクターなどによる機械化が進みました。そして、これからはロボット化へ移行しようとしています。

もう1つは、頭を使う「営農判断」です。作物の生育状態や天候などから判断して農業従事者が行う意思決定です。今までは人の経験や勘などに頼っていましたが、これからはデータに基づいた営農判断が行われる時代になると考えられています。

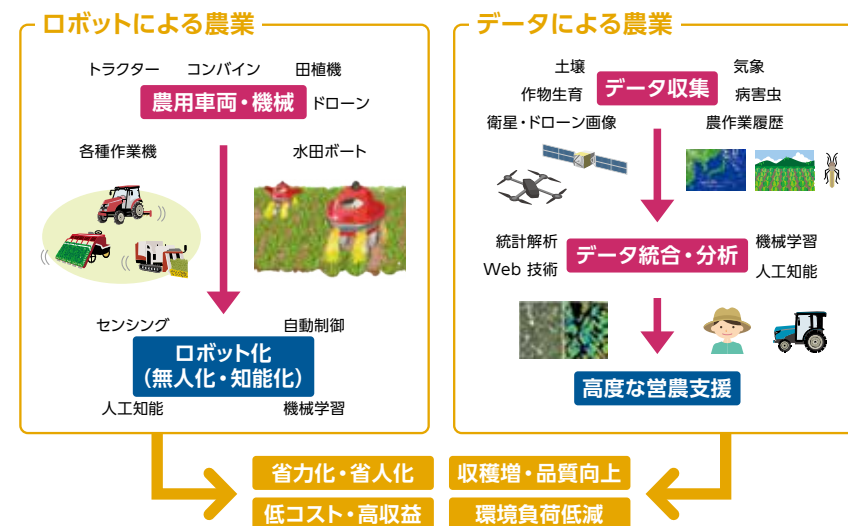
このように、今後は農業のICT化が進み、「ロボットによる農業」と「データによる農業」がますます発展していくと見られています。データによる農業の目標は、「熟練農家の知識・知恵をデータ化して継承」「農業の魅力向上と、新規就農の促進」「生産・加工・流通の連携による6次産業化^{*}の促進」などです。

営農判断における農業のICT化と、営農支援システム

では、データによる農業とは、どのようなものなのでしょう。従来、意思決定は熟練農家の経験や勘(個々の営農ノウハウ)に頼って行われてきました。しかし、参加しはじめたばかりの新人にこうした経験や勘にもとづく知識を伝えるのは難しいものです。農業のデータ化とは、こうした熟練農家の営農ノウハウを抽出して意思決定のプロセスを解明し、それを外に向かってオープンなものにするものです(図2)。

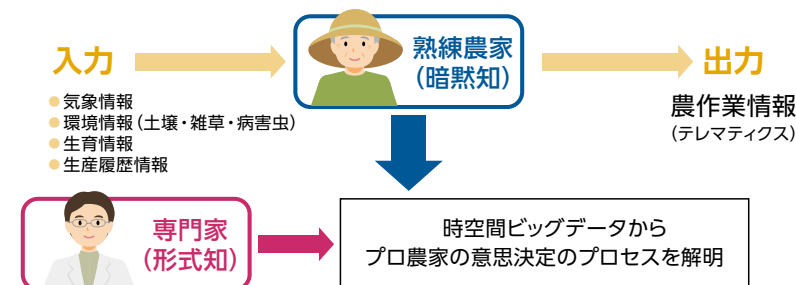
具体的な流れを見てみると、作業中の農機やドローン、人工衛星、圃場

図1 ICT(情報通信技術)を活用したスマート農業



農作業は、今後ロボット化が進み、省力化や省人化、低コストが達成される。一方、営農判断は、ICT化によって地理空間のビッグデータを利活用することで営農支援を行い、収量増加や品質向上、環境への負荷低減が期待できる。その他にも、各農業従事者のさまざまな経営上の課題の解決にもつながる。

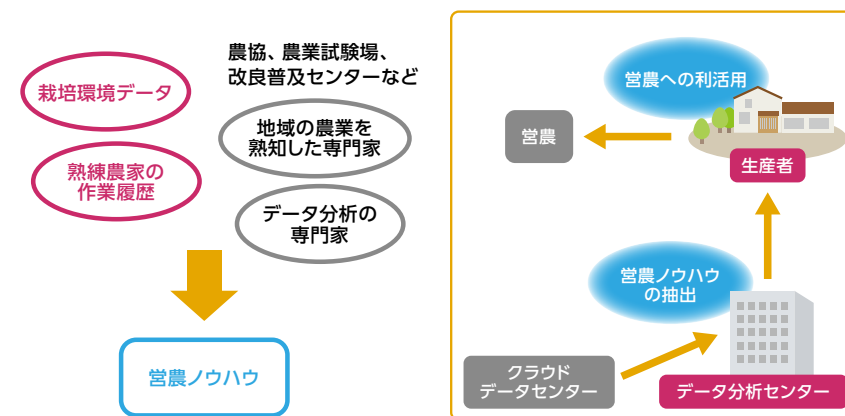
図2 営農ノウハウの抽出・データ化



他人に伝えることが困難な知識や知恵、経験などのことを「暗黙知」という。気象情報や環境情報などから熟練農家が意思決定し、作業という形で出力する。この出入力を記録し、専門家の知識も加えて意思決定プロセスを解明する。こうして抽出された営農ノウハウは、誰でも利用できるオープンなものにする。

^{*} 6次産業化：農林漁業(1次産業)だけでなく、製造・加工業(2次産業)とサービス・販売(3次産業)も取り込むことで、農林漁業者の所得(収入)を向上させること。

図3 ビッグデータの分析と活用



左は全体的な概念を、右はデータの流れを表す。専門家は農協の指導員や試験場、改良普及員など、その地域の農業を熟知している者が行う。

に設置されたセンサーからの栽培・環境データ、そして熟練農家の作業履歴などのデータを集めてデータ分析センターで分析し、これらの情報に「いつ、どこかの情報か」といった時間情報と位置情報を付加していきます。そしてそこに農業の専門家やデータ分析の専門家の見識を加えて営農ノウハウとして抽出し、ビッグデータとして活用します(図3)。

もちろん、ある地域のフレームワーク(枠組み)の中で情報を集めて営農ノウハウを抽出しても、他の地域でそれをそのまま活用することはできません。たとえば北海道の農場と九州の農場では、営農のノウハウは異なっているはずです。

このため、将来的には、それぞれのフレームワークを共通化して、地域ごと、作物ごとにデータを収集して分析することで、各地域ごとの営農支援システムを作り上げていくことを目指しています。また、生産の現場だけでなく、貯蔵・加工・流通、さらには消費者の食卓までを網羅した「生産から消費までの一気通貫の情報化」も期待されています。

そして、生産現場の農業従事者に対しては、ICTを利用することで営農判断を助ける「営農支援システム」が開発されているのです。

図4 営農支援システム KSAS

KSAS とは農業経営を見える化して農業経営課題の解決をサポートする営農・サービス支援システム



画像：(株)クボタの資料より作成

写真1 パソコンやスマホで運用できるKSAS



ログイン画面にIDとパスワードを入力して操作開始。

(()) 「KSAS」にみる営農支援システム活用の実例

ここでは、(株)クボタが開発した営農支援システム「KSAS (Kubota Smart Agri System)」(図4、写真1)を取り上げて、データに基づいた営農の仕方を具体的に見ていきます。

KSASは、農業経営に関するすべての情報をKSASのクラウドで一元的に管理することで農業経営を「見える化」し、経営上のさまざまな課題の解決をサポートするシステムです。以下、具体的な課題解決を、いくつか例をあげて見てみましょう。

課題①：圃場管理

いくつもの圃場を管理することは大変ですが、KSASでは圃場の名前やそれぞれの面積、細かい住所などを一元管理します。パソコンやスマホのどちらでも管理できるので、現場に出てからはスマホで確認しながら圃場を管理することができます。画面はグーグルマップなどの電子地図を使

たくさんの圃場があって、紙の地図では管理が大変…。

地図を毎年作り直すのが大変…

新人さんに圃場の場所を教えるのが大変



って表示されるので非常に見やすく、また所有者や作物ごとなどに自由に区画の色を設定することができます(写真2～4)。

このように、圃場登録はクリックだけで簡単にできる上に、スマホでも登録できるので、現場でも登録が可能です。紙の地図にいちいち書き込む必要がなく、短時間で登録をすませることができます。

写真2～4 圃場管理

写真2

ある区画をクリックすると、右側にその圃場の名前や面積、住所などの情報が出る。



写真3

圃場登録は、圃場情報一覧の「圃場台帳」→「圃場追加」→「このエリアの区画を読み込む」とクリック。すると全面がグレーになる(農水省の筆ポリゴンを使用)ので、該当圃場をクリックし、名前を登録する。



写真4

以後、同じ手順で登録をしていく。



課題②：作業記録

紙の日誌に作業記録をつけていく場合、内容が曖昧になったり、忙しいシーズンには疲れて日誌を書くのが困難になったりしがちです。KSASで

写真 5～7 作業記録



パソコン・スマホで
簡単日誌作成♪



写真 5

最初の圃場マップから「指示・日誌作成」をクリックして写真5の日誌作成画面に。

写真 6

いつ、どこで、誰が、どのような作業をしたかは、チェックを入れて選択したり、簡単な記入をするだけ。写真6は「作業項目の選択」。どの農機を使ったか、肥料や農薬を使ったかなどのこまかい記録を入力したり、メモ欄もあるので自由度が高い。



写真 7



日誌を振り返って確認したいときは、「日誌一覧」をクリックするだけで写真7のように一覧が出る。

はパソコンやスマホでクリック操作を行うだけで、いつでもどこでも作業日誌をつけることが可能となります。文字の入力は基本的に不要で、いつ、どこで、誰が、どのような作業を行ったのかについてそれぞれ項目を選んでいくだけです。

日誌を振り返る際も、作業期間や作業項目、圃場の場所などから絞り込んで簡単に確認できるうえに、加工しやすいExcelのデータとして出力することも可能になっています(写真5～7)。作付け計画や圃場、作業期間などによる絞り込みを使えば、関連する情報や作業内容がまとめて見られます。「この作業は去年はどれぐらいの期間で終わったのか?」といったことも、クリック1つで確認できるわけです。

課題③：作業進捗がわからない

圃場がいくつにもわたる場合、農作業の進捗状況をみんなで共有することで、作業漏れやミスの発生を防ぐことができます。KSASでは、カラフルな地図と円グラフを使って、全体の進捗状況が一目でわかるようになっています。作業前の朝礼などで進捗状況の情報を全員で確実に共有することができます。

作業進捗の画面では日誌の作成もできるので、たとえば作業が完了したときにスマホですぐ日誌に書き込めば、完了に関するデータがリアルタイムに全体の進捗状況に反映されることになります(写真8～10)。

写真 8～10 作業進捗

写真 8

「進捗状況」から確認。写真8は、耕耘作業が完了しているのが全体の33%であることをあらわしている。地図の各圃場の色は円グラフと対応し、青色は作業が完了した圃場。



写真 9



作業が終わればこの画面から作業完了の日記をつけられる。

写真 10

グレーは作業が終わっていないところ。グレーの圃場を選び、写真9のように記録すると、グレーが作業完了の青色となる。円グラフでは、全体の耕耘作業の完了が以前の33%から37%に自動的に更新されている。



課題④：栽培計画の立案

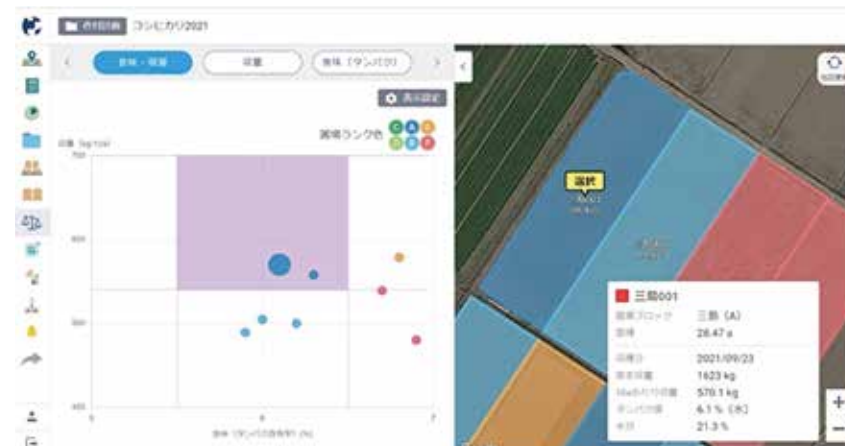
しっかり栽培計画を立てたのに資材費の管理が大雑把になったり、無駄な出費を抑えたいけれどどこに無駄があるのかわからないなどということがあります。

KSASには、どの作物をどの圃場で栽培するかを計画するための「作付計画」という機能があり、そこでは資材費の試算も可能です。作付けの面積と、使用予定の肥料や農薬の量および購入費を計算して費用の試算を行うことができます。こうすることで、どこにどれだけ費用がかかるかわかり、無駄な費用を削減することができますようになります。

KSAS 対応機との連携機能

KSASの持つその他の機能としては、「KSAS 対応機との連携」があげられます。(株)クボタはKSASのクラウドと連携可能なトラクターやコンバ

写真 11 KSAS 対応機との連携



KSASは、KSASと連携機能を持つクボタ製のトラクターやコンバインなどの農機やドローンと情報のやり取りができます。写真11は、作業中のコンバインからKSASに送信された作物の食味(タンパク値)のデータ。

インやドローンなどの農業用機器を開発しており、これらをKSAS対応機と呼んでいます。

圃場のKSAS対応機からそれぞれの位置情報や稼動情報、刈り取りした作物のタンパク値や収量の測定情報などがKSASに送信されます。逆にKSASで設定した肥料設定をKSAS対応機に送信して、作業中のトラクターに設定に沿って肥料を散布させることも可能となっています(写真11)。

また、作業機の電源を入れるとその位置情報や圃場の場所などがKSASに送信され、さらに作業内容の情報が自動日記に記録されます(「自動日記」)。つまりこの機能を用いれば、いちいち作業者がスマホやパソコンで日記をつける必要もなくなるわけです。

今まで説明してきたように、KSASのような営農支援システムは、ICTを活用することで「データ化された農業」を実現します。その結果、農業従事者の業務上の手間を省き、営農における省力化・効率化を実現させ、農業経営におけるさまざまな課題の解決に貢献します。

衛星リモートセンシングとは？

スマート農業には位置情報の活用や自動操舵システムなど、さまざまな技術がかかわっています。その中の1つである「衛星リモートセンシング（遠隔観測）」は、圃場自体の状態や作物の生育状況など、農作業や営農のために必要なデータを人工衛星を用いることで収集する技術です。

人工衛星には可視光や赤外線を観測する「光学センサー」や、マイクロ波を使った「レーダー」などのセンサーが搭載されています。これらを使って「広範囲を反復して観測できること」が最大の利点ですが、光学系のセンサーは雲や霧によって観測が妨げられるという短所もあります。

代表的な人工衛星としては、アメリカのNASA（米国航空宇宙局）が打ち上げた「ランドサット（Landsat）」シリーズや、ESA（欧州宇宙機関）の「センチネル1（Sentinel-1）」および「センチネル2（Sentinel-2）」、民間企業プラネット・ラブズ社の「プラネットスコープ（Planet Scope）」などがあります。このうち、センチネル1にはレーダー（合成開口レーダー）が、その他には光学センサーが搭載されています（図1）。

近年では、後で述べるように衛星の数が増えたこともあって、「観測頻度の向上」や「短時間でのデータ配信」が実現しています。また、単に衛星画像を販売・配信するだけでなく、ユーザーのニーズに合わせた加工データを提供するサービスも増えてきています。

用いられている技術——光学センサーと、衛星の連携

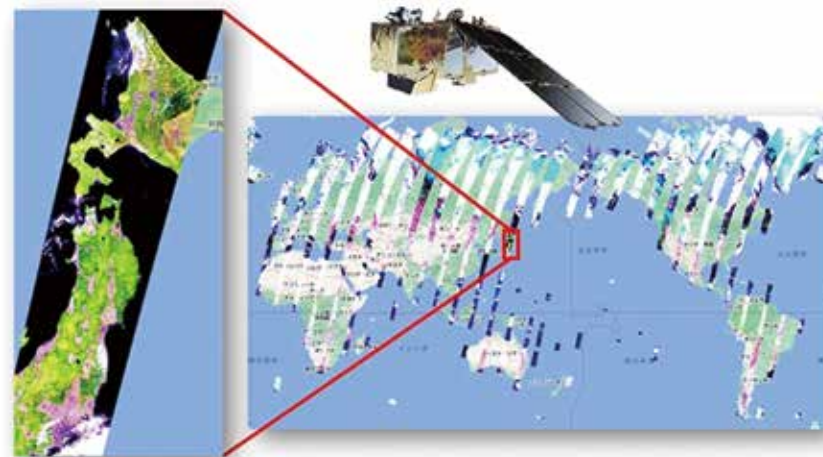
衛星リモートセンシングで使用されるセンサーについて、ここではセンチネル2の光学センサーを例に見てみましょう（図2）。

「バンド」は波長領域ごとの区分です。光の三原色である青、緑、赤（RGB）のほか、赤よりも波長が長い近赤外やレッドエッジ（植物の生育状況を知ることができる。後述）などを捉えることができます。赤・青・緑・近赤外の4つのバンドは解像度10m、レッドエッジと短波長赤外は解像度20mです。

近年では多数の衛星を連携させる「衛星コンステレーション[※]」方式が使

※コンステレーション：「コンステレーション（constellation）」とは、英語で「星座」の意。または星座の配置を表す。また、物や人などの集まりの意味もある。

図1 衛星リモートセンシングの実例——センチネル2



センチネル2は2015年に打ち上げられ、2機がペアで運用されている。高度786kmで、日本の上空をおよそ午前10時半に通過する軌道を取り、2機で世界の主な陸地を5日に1回の頻度で、南北方向に細長く観測している。観測の幅は290kmと広く、図のように1度の観測で北海道と東日本のほとんどを観測することが可能。データは、インターネットで誰でも無償で閲覧できる。

図2 センチネル2における解像度と観測波長帯

解像度	バンドNo.	領域	中心波長 (nm)	多くの地球観測衛星に搭載
10m	2	青	490	
	3	緑	560	
	4	赤	665	
	8	近赤外	842	
20m	5	レッドエッジ	705	
	6		740	
	7		783	
	8A		865	
	11	短波長赤外	1,610	
	12		2,190	

上記のほか、大気状態観測用のバンド（解像度60m）が3つある

「解像度10m」は一見、粗いように見えるが、広範囲を一度に観測する衛星リモートセンシングでは十分といえる。衛星観測におけるバンドは「バンド1」「バンド4」などと呼称される。レッドエッジは、可視光と近赤外の間の波長域。

われるようになっていきます。たとえば前出のプラネットスコープは、重量約6kgの超小型衛星を100機以上連携させることで、地球の陸地を毎日観測できるようになっています。また日本の(株)アクセルスペースは5機の衛星によって、指定した地域を2日に1回の頻度で観測しています。

(((人))) ドローンのセンシングとの違い

圃場のセンシング(観測)はドローンでも行いますが、人工衛星とドローンとは特性の違いがあります(図3)。

ドローンは天候が悪化していない限り、いつでも観測できますが、衛星は軌道を回っているため周期的な観測になり、自由度が低くなります。ただし、観測対象のスケールが大きい場合は人工衛星のほうが効率的です。また、ドローンは農家が自前または業者に委託して運用しなければならないのに対して、衛星は各国の政府機関や民間企業が運用しており、そのためユーザーは大きな労力を必要とせずにデータを得られるだけでなく、過去データを入手することも容易となります。

それぞれの長所を生かした利用をすることになりますが、1つの農場を詳細にセンシングするドローンのデータは「戦術的データ」、一定の期間を置いて広大な地域のセンシングを行う衛星リモートセンシングのデータは、長期的な「戦略的データ」と位置付けることができるでしょう。

(((人))) 衛星リモートセンシングにおけるデータの見方

反射特性がポイント

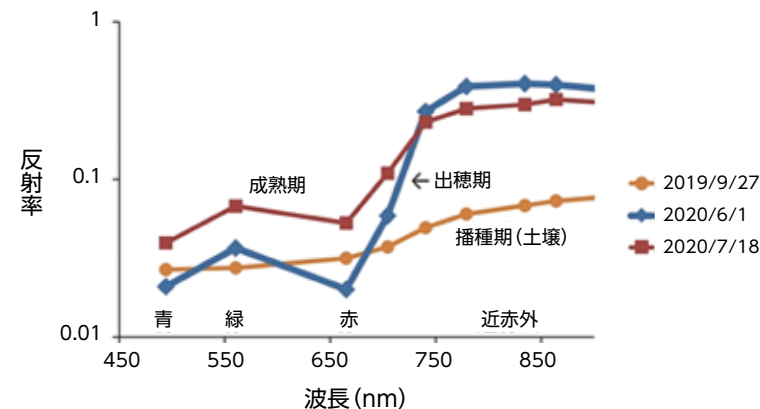
リモートセンシングで植生や土壌のようすを見る際には、可視光(青、緑、赤)や近赤外が対象物で反射される「反射特性」を観測します。

図4は、秋まき小麦の圃場を時期別にセンチネル2でセンシングした結果です。小麦の播種期である9月(27日)には、まだ土壌が見えているので波長ごとの反射率の差はあまりありませんが、翌年6月(1日)の出穂期^{しゅっすい}になると、可視光(特に青・赤)の反射率が低く、近赤外の反射率が高く

図3 人工衛星とドローンを使ったセンシングの違い

	衛星	ドローン
撮影タイミング	周期的	随時
対象スケール	圃場～全球	植物個体～農場
運用主体	外部	自前あるいは委託
過去データ	得やすい	蓄積が必要
天候制約	雲・霧(光学センサーの場合)	風・雨
規制		航空法その他

図4 センチネル2による植生と土壌の反射特性



グラフの3つの折れ線は、それぞれその日における反射特性を示す。成熟期の7月18日の反射特性は、クロロフィルが減少して小麦の色が黄色く変化するので、可視光(青・赤)の反射が強まり、一部の葉が枯れるので、近赤外の反射が低下している。

図5 植生指数とその計算式

正規化植生指数 (NDVI)

$$NDVI = \frac{(\text{近赤外} - \text{赤})}{(\text{近赤外} + \text{赤})}$$

$$GNDVI = \frac{(\text{近赤外} - \text{緑})}{(\text{近赤外} + \text{緑})}$$

拡張植生指数 (EVI)

$$EVI = 2.5 \times \frac{(\text{近赤外} - \text{赤})}{(\text{近赤外} + 6 \times \text{赤} - 7.5 \times \text{青} + 1)}$$

2バンド拡張植生指数

$$EVI_2 = 2.5 \times \frac{(\text{近赤外} - \text{赤})}{(\text{近赤外} + 2.4 \times \text{赤} + 1)}$$

なっています。これはクロロフィル(葉緑素)が青と赤の光を吸収し、近赤外を強く反射するからです。

このように、可視光や近赤外の反射特性から、作物の生育状況が把握できるわけです。

植生指数(植生指標)

リモートセンシングでは、捉えた電磁波の反射特性データから計算して数値を得て、それを作物の状況を示す指標として活用します。この数値は「植生指数(または植生指標)」と呼ばれています。植生指標は、植被率や葉面積指数*など作物の「生育量」や、クロロフィル濃度に関係する「葉色」などを反映しています。

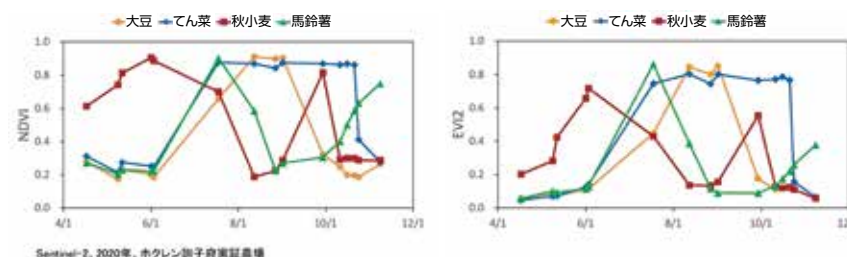
植生指数の代表的なものとして、近赤外と可視光の赤との差を両者の合計で割って算出する「正規化植生指数(NDVI)」があります。NDVIは算出された数値が-1から+1の範囲に収まるので使いやすい指数で、茂った植生では+1に近くなり、植生がない土壌ではおおむね0.3以下の値となります(図5)。

NDVIは、背景の土壌の色や観測時の大気の状態などいろいろな要因の影響を受けやすいので、この点を改良した「拡張植生指数」もあります。これには3つのバンドで算出する「EVI」と、2バンドで算出する「EVI_2」などがあります(図5)。

畑作物のNDVIとEVI_2の季節変化をグラフに示しました(図6)。NDVIでは、秋まき小麦、馬鈴薯、大豆ではおのおのの開花期にピークがあり、各作物の生育プロセスが反映されていることがわかります。グラフでは各作物とも最大値が0.9前後と揃っていますが、これは上限に近づくことで飽和状態、つまりおのおのの作物の繁茂が最大となり、細かい生育量の差が見えなくなったからです。EVI_2ではNDVIよりも飽和しにくいので生育のピークがもう少し明瞭になり、春先や収穫後の植生のない時期の値がもっと安定して低くあらわれます。

*植被率や葉面積指数：植被率は地表がどの程度、植物に覆われているかを表す割合。一方、葉面積指数は、植物の葉の総面積をその土地の面積で割った値で、作物などがどれだけ繁茂しているかを示す。この2つは、作物の生育量に関係する。

図6 作物のNDVIおよびEVI_2の季節変化



NDVI (左) では秋まき小麦が開花時期の6月にピークになるなど、開花時期の前後にNDVIがピークとなっている。てん菜も繁茂期の7月末から3か月ほどNDVIが高い状態が続いている。秋まき小麦の9月末のピークは収穫後にまいた緑肥。飽和しにくいEVI_2のグラフ(右)はNDVIと似ているが、各作物の生育ピークの値が若干異なって出ており、生育量が最大の部分ではNDVIよりもやや詳細に把握できる。

「圃場の不均一性」を調べる

土壌の浸食やもとの地形に起因して、圃場の土壌の性質が不均一になることがあり、それによって生育にばらつきが出たり、部分的な倒伏が起こったりして適切な時期に収穫ができなくなったり、収穫物の品質がそろわなくなったりする恐れがあります。そのため、圃場の均一性やどこがどう不良なのかを把握する必要がありますが、衛星リモートセンシングでは、たとえば土壌の有機物量を示す「腐植含量」を観測することで土壌の状況を把握することができます(図7)。この結果に基づいて可変施肥などを行い、圃場の不均一を是正することも可能となります。

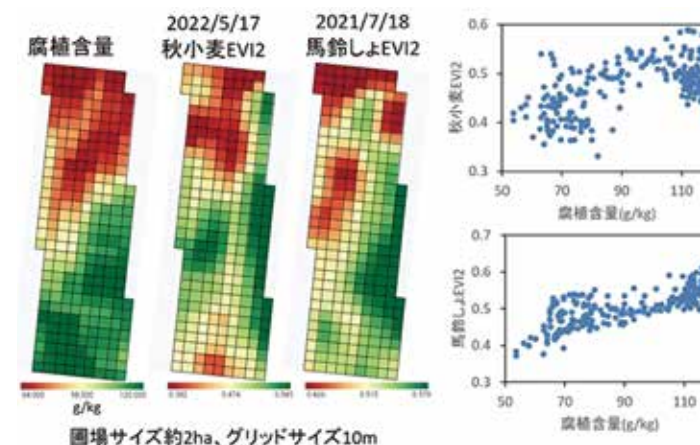
衛星リモートセンシングの実例

衛星画像では、腐植含量が高い、あるいは湿った土壌は黒く映ります。このため、水分量が一定の時期に観測すれば、土壌の腐植含量を可視光の反射率で推測することも可能です。これは30年以上前から知られている方法で、現在農業分野で利用されています(図8)。

また、米のおいしさはデンプンの性質とタンパク質の含有量によって左右されますが、タンパク質含量は稲の葉のクロロフィル含量と対応するため、植生指数によって推定できます(図9)。この手法は20年前に北海道で生まれて各地で利用されています。たとえば青森県では2010年から衛星リモートセンシングによるGNDVIを用いたマップを使用しています。

道東地域では、秋まき小麦の植生指数の低下から最適な収穫時期を決定することで乾燥施設にかかるコストを低減させています。また十勝農協連では組合員の圃場マップにセンチネル2のデータを見る機能を追加することで、組合員の営農支援が行われています。この他にも、民間企業などが衛星リモートセンシングのデータによるサービスを行う例もいくつかあります。いずれにせよ、現代農業では衛星リモートセンシングによるデータが幅広く活用され、「農業の情報化」が進んでいるのです。

図7 土壌の腐植含量と作物のEVI 2の関係



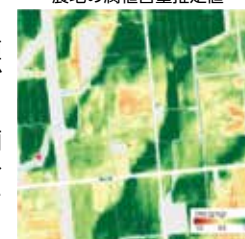
図はホクレン訓子府実証農場をセンチネル2でセンシングしたデータ。左の3つの図の1マスは10m四方を表し、「腐植含量」では値が高いほど緑色となる。秋まき小麦と馬鈴薯のEVI 2は、生育が良いところが緑。腐植含量が高い所でEVI 2の値も高くなっており、圃場の茶色の部分を中心に窒素肥料を増やす可変施肥を行えばよい。

図8 土壌の腐植含量推定

Sentinel-2 トゥルーカラー
2020/6/1

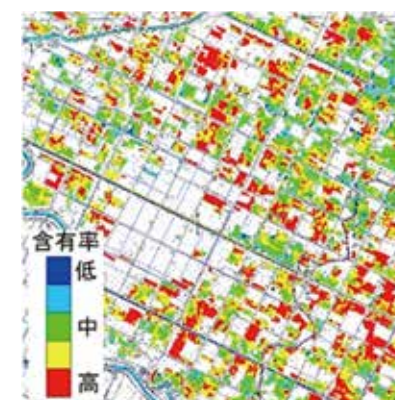


上の画像は腐植含量が低い所が黒く映っており、下の推定値の画像ではその部分が濃い緑で示されている。



志賀ら(2022)

図9 米のタンパク質含量のマップ化



安積・志賀(2003)

タンパク質含量では、かなり細かい圃場の状況が把握できるようになっている。

「可変施肥」とは何か？

圃場での作物の生育状態は均一ではなく、どうしてもばらつきが出てきます。「可変施肥」とは、作物の生育や土壌などのばらつきに合わせて、圃場の状況に応じた施肥を行う技術です。ばらつきの情報は、センサによるセンシング(観測)で取得し、その結果をもとに、施肥量を自動的に制御します。適切な施肥量をコントロールすることで、収穫物の全体の品質を安定化させたり、逆に肥料の過剰散布による環境への負荷を低減させたり倒伏を防ぐことが可能となり、最終的には農家の増収にもつながります。

情報収集に関して、可変施肥は、「センサベース」と「マップベース」の2つに大きく分けられます(図1)。センサベースは、圃場でトラクターなどに装備されたセンサでセンシングし、施肥機を制御して散布する技術です。

一方のマップベースは、あらかじめ施肥マップを作成して、施肥をするときに、施肥機がマップ上の位置を認識して施肥を制御します。このため、位置情報を把握できるGNSS(全地球航法衛星システム)のガイダンスシステムが必須となります。

可変施肥で用いられるセンシング

可変施肥では、圃場内の作物の生育や土壌などのばらつきを把握することが、まず必要となります。それを把握するために「生育センシング」「土壌センシング」「収量センシング」が用いられます(図2)。

生育センシングは作物の生育を観測するもので、車載型センサの他にドローンや衛星も用いられます。作物が保有する窒素量を調整する「窒素可変施肥」などに利用されます。

土壌を観測する土壌センシングでは、トラクター装着型のセンサを用いる場合は土壌のサンプリングと化学分析を併用します。ドローンや衛星によるセンシングは、圃場の表層の腐植含量の把握にとどまっています。

収穫物の状態を観測する収量センシングは、コンバインに装着されたセンサを用いて、生育がいい場所・中間の場所・悪い場所の3段階のゾーニングをするときなどに利用されます。

図1 センサベースとマップベース

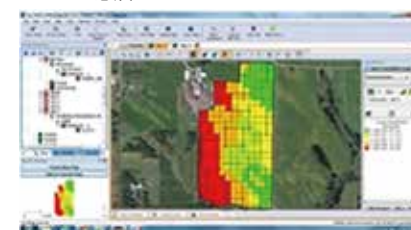
センサベース可変施肥



- 実用化されているのは生育センサのみ
- 追肥で利用(小麦、馬鈴薯)
※本州では水稲

マップベース可変施肥

GNSSが必須



- 生育、土壌、収量のセンシングデータが実用化
- すべての作物の基肥で利用可能

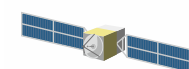
センサベースの可変施肥では車載型の生育センサが実用化されており、小麦や馬鈴薯などで使用されている。マップベースの可変施肥では衛星やドローンなども使われ、生育だけでなく土壌や収量のセンシングも可能。マップ作成の手間はあるが、得られたデータから次作の基肥での利用も可能なため、すべての作物に対応できる。

図2 センシングの種類

生育センシング



車載型
低空リモートセンシング
(UAVなど)



高層リモートセンシング
(人工衛星)

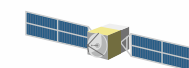
土壌センシング



サンプリングと化学分析の併用による多成分マップ作成可



表層のみ
(腐植含有量、水分)



収量センシング



制御・表示部
水分測定部
質量測定部



コンバインに装着されたセンサ

なお、施肥機と操作端末がISOBUS対応(基礎編・第3節参照)の場合は、施肥機の操作やGNSSによる自動操舵を操作端末1台で行えます。

いかにして施肥量を計算するか

写真1は十勝管内の圃場の衛星による可視画像です。黒い部分があったり、また土の色がばらついていて、施肥を単純に一律の量で行うと局所的な倒伏や生育不足が生じる原因となってしまうので、部分ごとに細かく設定しての可変施肥が必要です。

では、センシングデータをもとにどのように施肥量を計算するのでしょうか。たとえばセンサベースの可変施肥では、センシングと同時に施肥機を制御するので、その場での計算が重要となります。

秋まき小麦の止葉期^{とめば}の場合、追肥量決定のための生育診断指標がすでにあるので、生育診断に使用される手分析データをセンサ値に置き換えて施肥量を計算させます。このため、車載型生育センサを利用する場合は、車両が走行するだけで1秒ごとに最適な追肥が自動的に行われます。

これに対し、生育診断指標がない時期では、人が任意に基準となるセンサ値と施肥量を決定する必要があります(図3)。

実際の効果と、導入の際の下限面積について

可変施肥の効果については、特に秋まき小麦の可変施肥の実証データが数多く存在していて、それらによると、倒伏の軽減や、粗原収量^{*}4%の増加効果が認められています。実際に可変施肥を導入したユーザーからは、今まで施肥量を控えめにしていたが、増収ギリギリを狙う“攻め”ができるようになったとの意見も出ています。

北海道では、秋まき小麦以外にもてん菜や馬鈴薯、にんじん、たまねぎ、キャベツで実証実験が行われており、可変施肥による増収効果は数%から最大5%ほどであることが示されています。

こうした可変施肥に必要な機器を導入する際、どれくらいの耕作面積で採算が取れるのでしょうか。車載型生育センサによるセンサベースでの試算では、機器の組み合わせによって若干の違いはありますが、初期費用としておよそ600万円かかります。単品の作物のみで使用する場合は、経営規模70～100haが必要なので、大規模農家や企業農家、あるいは共同

^{*}粗原収量：畑で採れたままの状態の収量。

写真1 圃場の衛星による可視画像

圃場数十をサンプリングして分析した結果、たとえば秋まき小麦で窒素量換算10a当たり6～7kgの施肥量の差があった。秋まき小麦の総窒素施肥量は10ha当たり15～16kgなので、6～7kgものばらつきは無視できない量といえる。



図3 診断指標のない時期、地域、品種の追肥量算出方法

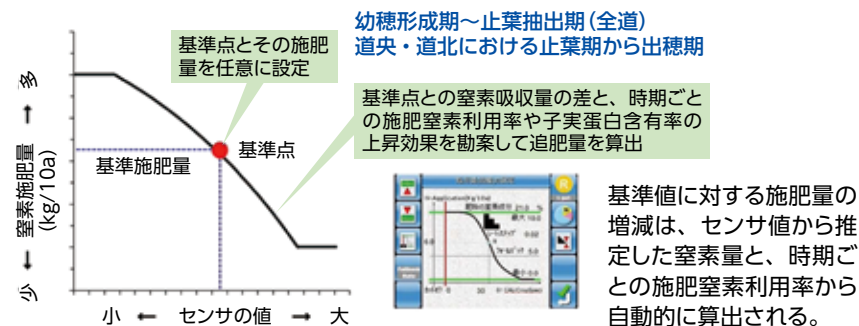


図4 可変施肥の効果の検討

償却対象	センサベース			センサベース+マップベース		
	秋まき小麦のみで利用			小麦・馬鈴薯・てん菜で利用		
	小麦(ha)	畑3品(ha)	畑4品(ha)	各作物(ha)	畑3品(ha)	畑4品(ha)
生育センサー式	13.9	41.8	55.8	4.9	14.8	19.7
可変施肥機込み	24.3	72.8	97.1	8.2	24.5	32.7

アプリケーション(ソフトウェア)の追加で
利用下限面積の大幅な低減が可能

での利用がお勧めです。

一方、センサベースだけでなくマップベースも利用して品目を増やし、最終的に追肥だけでなく基肥でも適応できるようにすると、24～33haという、平均的な個別利用でも採算がとれると考えられています(図4)。

可変施肥の効果を見るときに注意点

可変施肥を行う上では、その効果がある圃場を見極めることが大切です。たとえば、「土壌の腐植」と「生育の関係」を比べる方法があります。写真1のような圃場の画像と、その生育マップを比べると、「土壌の黒い箇所（腐食が多く窒素が多い）ほど生育が良い圃場」と、逆に「土壌の黒い箇所で生育が劣る圃場」もあります。前者は土壌の腐植と生育の間に「正の相関」があり、後者は「負の相関」があるといえます。土壌センシングにもとづくこうしたケースでは、植物が利用できる可給態窒素の不足や、黒い箇所が腐植含量によるものではなく、水分量が多い所であることもあります。

負の相関の圃場では、可変施肥の効果は小さくなるので、機器の導入の前にこうした圃場の判別を行うことで、無駄な投資を抑え、効果的な導入を行えるようになります。

また、土壌に石や礫が多いために作物の生育期間の後半で急激に生育が低下するケースや、土壌の物理的特性や排水性が悪い箇所で収穫時の枯れ上がりが遅いケースなども確認されています。このような物理特性が良くない箇所では肥料の増量が無駄になるケースもあるので、圃場自体の改良や、それぞれの箇所における施肥の時期や、作物の種類に応じた施肥マップの作成が重要となります。

可変施肥の実際

（株）トプコンポジショニングアジアの機器を例に、実際の可変施肥^{*}がどう行われるかを見ていきましょう。流れのイメージをつかんでください。

センサベース可変施肥

通常は、各圃場にどれくらい施肥をするかを作業者が設定しなければなりません。写真のシステムを使えば、生育量に合わせて、それぞれの箇所での施肥量が自動的に設定されます。

作業機に搭載した生育センサ CropSpec^{クロップスベック}（写真2）がとらえたデータを受

^{*}実際の可変施肥：センサベース可変施肥は、野外ではなく室内でのデモンストレーションです。

写真2～6 センサベース可変施肥

写真2



車両に搭載される生育センサ（製品名CropSpec）。レーザ光を使用して、作物の生育量を検知する

写真3



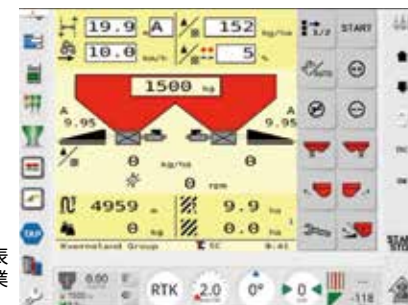
車両に設置されるコンソール端末。生育センサがとらえた生育量を施肥量に変換して、実際に肥料を撒く作業機に送る

写真4



生育センサのセンシングの様子ですがコンソールの画面で確認できる。車両の左右にレーザをあててセンシングを行っている

写真5



コンソールに表示された、作業機の設定画面

写真6



施肥量が作業機に送られると、実際に撒かれた施肥量が画面上に色分けして表示される

けたコンソール（写真3）は、生育量を施肥量に変換します。生育が悪い箇所には肥料を多く撒き、生育が良い箇所には肥料を少なく撒くという設定がここで自動的に行われ、実際に肥料を撒く作業機に送られます。コンソールの画面では車体左右にレーザ光が広がり、センシングのようすがわかります（写真4）。同時に作業機の状態もわかるようになっています（写真5）。施肥量が作業機に送られると、実際に撒かれた施肥量が画面上に色分けして表示されます（写真6）。

マップベース可変施肥

マップベースの可変施肥では、トラクターを走行させて作業機に境界線を記録させます。

まず圃場を登録し(写真7)、境界線の記録をどこから行うかを設定します(写真8)。実際にトラクターを操作して作業境界線を記録します。境界線はディスプレイ画面上で青いラインによって表示されます(写真9)。

次に施肥マップの作成の流れを見ます。まず、該当する圃場の生育データを読み込んで、そのデータを表示します(写真10、11)。

次に「処方箋マップの作成」で施肥量や使う肥料を決め、それを保存します(写真12)。どの生育量に対し、どれくらいの施肥量を撒くかを示すグラフを使って細かい設定をすることもできます(写真13)。

作成した処方箋マップをダウンロードしてUSBメモリで境界線を設定した作業機にわたし、トラクターを走行させれば、後は作業機が自動的に施肥を行ってくれます。このように、作業機の境界線設定や処方箋マップの作成は簡単に操作しやすいよう作られています。

写真10



該当する圃場(大きな緑の部分)に、車両搭載センサやドローンおよび衛星から得られた生育データを読み込む

写真11



読み込んだ生育データが表示された状態



写真12

処方箋マップを作成する画面。どの肥料を使うかを定める「製品の選択」画面

写真13



左にあるグラフなどを使って細かいレシピ設定も可能

写真7~13 マップベース可変施肥

写真7



圃場の登録

写真8



境界線を作成

写真9

トラクターを運転して境界線を記録



ピンポイント防除技術の意義

除草や病害虫駆除のための農薬散布は農業にとって重要ですが、SDGsの観点からも環境負荷低減に向けた取り組みが求められています。

圃場の必要な箇所に必要な量の薬剤を散布する「ピンポイント防除技術」は、薬剤の過剰な散布を抑制し、環境への負荷を低減させるとともに、必要なところのみに薬剤を散布するので、資材コストの低減を図ることが期待できます。

では、ピンポイント防除技術とはどのようなものなのか、ホクレン（ホクレン農業協同組合連合会）の取り組みを中心に見ていきましょう。

ドローンを使ったピンポイント防除技術

農業の担い手不足・高齢化といった状況への対策として、作業的に苦勞が多い農薬散布の省力化を進めているホクレンでは、今まで農薬散布を担ってきた無人ヘリコプターに代えて「農薬散布用ドローン」の活用を検討しています。ドローンは無人ヘリコプターよりも小さく、広大な面積を散布するのは不利ではないかとの指摘も出されましたが、トータルで見るとときに優位性があると判断されました（図1）。ホクレンでは2021年より、ドローンによる農薬請負散布事業を開始しています。

さらにホクレンでは、「みどりの食料システム戦略」*やSDGsの観点から、農薬をできる限り削減しつつ品質や収量を確保するために、ピンポイントの農薬散布をドローンによる請負散布事業で実施することを考え、北海道庁やNTTドコモと連携して技術開発を進めています。

ピンポイント防除技術の概要

ピンポイント防除技術はドローン以外の方法も検討されています。

たとえば、リモートセンシングと農薬散布を組み合わせた「ピンポイント農薬散布」です（図2）。リモートセンシングによって雑草や病害虫の被

*みどりの食料システム戦略：環境を重視する国内外の動きが加速していく中で、これらに対応しつつ日本の食料・農林水産業において持続可能な食料システムを構築することを目的として策定された。食料・農林水産業の生産力の向上と持続性の両立を、技術革新で実現するとしている。

図1 請負散布時におけるドローンの優位点

- 暖機運転が不要
- 圃場間移動時の運搬作業が楽
- 小型であるため、予備機も現地まで持って行くことが可能
- 電波の混信が起きにくい
- 大量散布も対応可能（4.2ℓ/10aなど、機種によって異なる）

試験や事業のようす

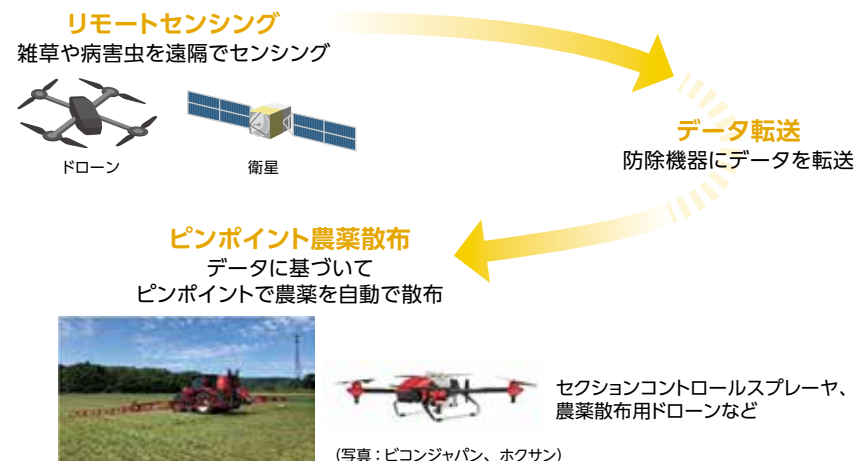


無人ヘリとドローンの作業性比較

事業における作業のようす

無人ヘリとの作業性比較などから、ドローンの優位性が確認された。ドローンは朝一の暖機運転が不要で、また小型なので圃場間の運搬が楽である。さらに予備機も容易に運べるので、現地でトラブルがあったときも対応できる。一方、比較試験の結果、大量散布にも対応が可能であることも判明した。

図2 リモートセンシングと農薬散布を組み合わせた技術



ただし、病害虫のセンシングでは衛星はあまり利用されない傾向にある。実際にピンポイント散布を行うのは、散布する区域を制御できるスプレーヤ（セクションコントロールスプレーヤ）や、農薬散布用ドローン。

図3 2022年より部分的に始まったホクレンの請負サービス

《ドローンの飛行、撮影、データ解析までの請負サービス》

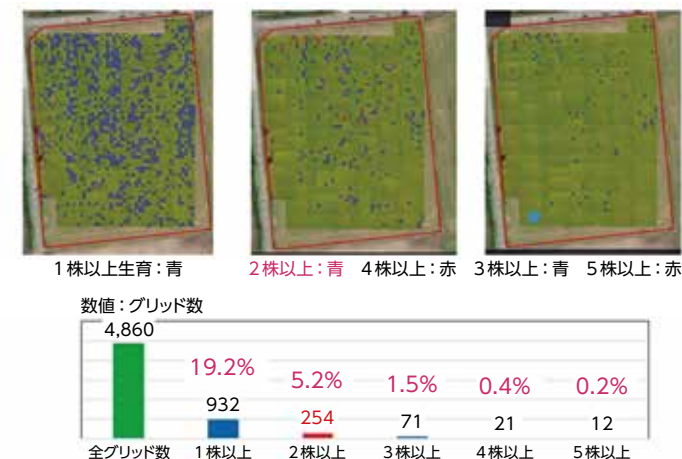


害を発見し、その解析データを防除機器に転送します。そうして得られたデータに基づいて、農薬散布用ドローンや、セクションコントロールが可能なスプレーヤなどの防除機器がピンポイントで自動的に薬剤を散布します。

2019～2021年にかけて、北海道庁では草地に生育する雑草エゾノギシギシ(以下、ギシギシと表記)に対するピンポイント農薬散布の開発が行われました。ドローン(UAV)や衛星を使った生育調査を行い、それをもとにギシギシがどこに生えているかを表す圃場マップを作成して防除を行います。

ホクレンはここで開発された技術を採用し、リモートセンシングではNTTコミュニケーションズやNTTドコモ、ピンポイント農薬散布ではピコンジャパンや三菱農機販売(共にセクションコントロールスプレーヤ関連)、ホクサン(農薬散布用ドローン関連)と連携して普及を進めています。そして、ドローンによるデータ収集、雑草の位置確認、そのマップ化のサービスの提供を2022年より開始しています(図3)。ただし、ドローンによるデータ収集サービスは行われていますが、後述の理由によってドロー

図4 訓子府実証試験農場のエゾノギシギシ生育マップ



各マップの1グリッド(1コマ)は3.6m×3.6mで、4,860グリッドより構成されている。左のマップはエゾノギシギシ(以下、ギシギシ) 1株を青で表示。中央のマップはギシギシが2株以上を青、4株以上を赤で表し、右のマップは同じく3株以上を青、5株以上を赤で表している。ドローンのセンシングによって、雑草の生育状況をここまで詳細に把握することができる。

ンによる散布は現在の実施されていません。

リモートセンシングによる雑草特定の実証試験

リモートセンシングによる雑草の特定は、実際にどこまで可能なのでしょうか。

ホクレンの訓子府実証農場で行われた試験では、4haの圃場をドローンによって事前にセンシングし、ギシギシの生育状況を調査しました。センシング自体は1haあたり5分ほどで、また解析は数分で完了し、その結果、雑草の詳細な生育状況を把握できることが実証されています(図4)。

ピンポイント防除を行う機器(ホクレンの例)

ドローンによるセンシングでは、牧草地や農地上空をドローンが飛行し

写真 1・2 ドローンによるセンシング

写真 1

牧草地に生えている雑草エゾノギシギシ



写真 2

撮影中のドローン



てRGBカメラによって撮影します(写真1、2)。その画像からAI(人工知能)の「画像認識」機能(基礎編・第8節参照)によって、ギシギシが生えている位置を自動的に特定します。

実際にピンポイント散布を行う機器としては、まず農薬散布用ドローンがあります。写真3、4は、XAG製の「XAG P30」と呼ばれる農薬散布用ドローンです。この他、スプレーヤとしては、ビコンジャパン製「iXterシリーズ」のブームスプレーヤなどがあります。この作業機はもともと「セクションコントロール」機能を持ち、農薬を撒く区画の設定ができるようになっています(写真5、6)。

地上を走行する車両型のピンポイント防除機器としては、小型の無人散布車両「XAG R150」があります(写真7)。これはもともと果樹栽培用としてつくられたもので、車体後方に付けられている2つのノズルから農薬を散布します。このノズルは可動し、左右のみに動かしてスプレーヤ的な散布を行うこともできます。

こうした防除作業機は、センシングによって得られたデータに基づいて薬剤散布が必要な区域と不要な区域を識別して散布を自動的に制御します。このため、位置情報を把握するためのGNSSガイダンスシステムが必要となります。

なお、現在はXAG P30、R150は自動でデータ連携しないため、連携に向けた開発が進められています。

写真 3・4

ピンポイント防除に使われる機器



写真 3

XAG P30 農薬散布用ドローン。機体の上部の白い部分が、薬剤を入れるカートリッジ式タンク



写真 4

タンク容量は最大16ℓ。ビートなどの防除の場合、満タンに入ると1町(約1ha)分となる

写真 5・6

セクションコントロールスプレーヤの実演

写真 5



ブームの外側で農薬を噴射中。

写真 6



外側と内側で噴射。送られてきたデータに基づいて、こうした区域ごとの切り替えが自動的に行われる。

写真 7

地上を走行する車両型の機器

XAG R150。車体上の白い部分がカートリッジ式タンクで、ここに薬剤を入れる。



ピンポイント防除の実際の効果

ピンポイント防除技術の実際の効果について、ホクレンが2022年7月に実証試験を行っています(図5)。

まず、およそ4haの圃場をセンシングしたところ、15,322株のギンギンが確認され、圃場全体のうちの61.7%に3株以上のギンギンが生育していました。

これに対してピンポイント散布を行って29日後にセンシングをした結果、15,322株だったギンギンが985株にまで減少していました。実質、93.6%の駆除に成功したことになります。

試験結果としては十分な結果が出たといえますが、注意点があります。29日という時間が経っているので、雑草ではない草が生育して、残っているギンギンを覆い隠したためにセンシングで検知できなかった可能性も指摘されています。

とはいえ、15,000株ほどだった雑草を1,000株にまで減らすことができた効果は大きく、この実証試験は今後も継続される予定となっています。

ピンポイント防除技術の問題点と今後の展望

ここで紹介した実証試験や、部分的とはいえ開始された請負事業などから見ても、ピンポイント防除はほぼ確立された技術と言えるでしょう。

しかし、解決すべき問題もあります。1つは農薬散布用ドローンでデータを連携させるためのシステム開発です。もう1つは、無人航空機による散布を行う際に、散布登録を有している除草剤がまだ存在しないという点です。実はこうした規制上の制約があるため、農薬散布用ドローンによるピンポイント散布を実施できないというのが現状です(スプレーヤのような地上散布であれば、現在の農薬登録でピンポイント散布を行うことは可能です)。

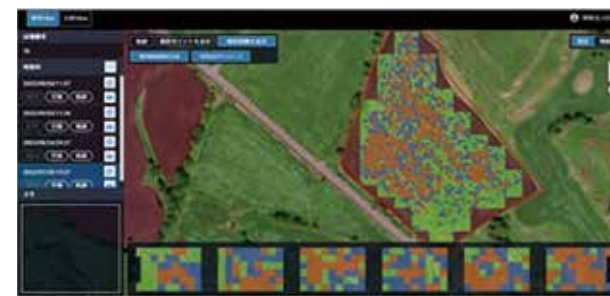
ただし、技術的には可能となっていることから、各試験研究機関や農薬メーカー、ICTベンダー(販売供給元)などが連携し、いずれは農薬散布用ドローンによるピンポイント散布も可能になるとみられています。

図5 ピンポイント防除の実証試験の結果

ピンポイント散布実施前の状況

- ピンポイント散布実施日：2022年7月26日
- 圃場面積：4.13ha
- 散布面積：2.55ha
- ギンギンカウント数：**15,322**
- 散布薬剤：ハーモニーDF (5g/10a)
- 散布機器：セクションコントロールスプレーヤ

釧路管内現地圃場
(散布前)



ピンポイント散布作業後の状況

- センシング実施日：2022年8月24日(実施29日後)
- ギンギンカウント数：**985 (93.6%減)**
- その他：草地刈取後に日にちが経過しており、草がギンギンを覆い、実際よりギンギンが少なく検出された可能性はある

釧路管内現地圃場
(散布後)



ピンポイント散布を行う前の圃場ではギンギンが繁茂し、マップではその場所が茶や青で表示されている。ピンポイント散布を実施しておよそ30日たった後のマップでは、茶と青の表示がほとんどなくなっている。