



スマート農業オンライン講座

フォローノート

基礎編・応用編・トレンド編



北海道大学スマート農業教育拠点

スマート農業オンライン講座

フォローノート

基礎編・応用編・トレンド編

北海道大学スマート農業教育拠点

本書のねらい

本書は、農林水産省スマート農業教育拠点事業の活動の一環として制作しました。農業関連の高校や大学などの先生方、農業における指導員等の方が、スマート農業の研修などで講義・講演を行う際の手助けとなるフォローノートとしてご利用ください。

構成は「基礎編」「応用編」「トレンド編」に分かれており、北海道大学が制作したビデオ教材「スマート農業オンライン講座」をベースに、なるべくわかりやすくまとめた内容となっています。

また、スマート農業を幅広く普及させるという観点から、本書は講師の先生向けとはいえ、実際に就農されている方や、高校や大学の学生の方々が読んでも理解しやすいような作りを心がけました。理解をより深めるためのイラストや写真などもできるだけ豊富に掲載しています。

ビデオ教材「スマート農業オンライン講座」は、YouTubeチャンネル、農林水産省のサイトでも見ることができます。オンライン教材とセットで利用することで、フォローノートの価値が高まると思います。ビデオ教材を見た後の復習として、フォローノートで学習した後に動画でその内容を確認するなど、皆様の環境に合った方法でご活用いただければ幸いです。

「スマート農業オンライン講座」講師一同

本書のねらい	2
--------------	---

序章	6
----------	---

第1章 基礎編	12
---------------	----

スマート農業技術の基礎

第1節 GNSS	14
----------------	----

第2節 車両ロボット	22
------------------	----

第3節 ISOBUS	30
------------------	----

第4節 安全センサ	38
-----------------	----

第5節 クラウド型データベース	46
-----------------------	----

第6節 通信技術	54
----------------	----

第7節 マシンビジョン	62
-------------------	----

第8節 人工知能(AI)	70
--------------------	----

第9節 ドローン	78
----------------	----



第2章 応用編 86

作業の自動化

第1節	自動操舵	88
第2節	農作業ロボット	96
第3節	遠隔監視ロボット農機	104
第4節	水管理システム	112

データの利活用

第5節	営農支援システム	120
第6節	衛星リモートセンシング	130
第7節	可変施肥技術	138
第8節	ピンポイント防除技術	146

第3章 トレンド編 154

作業の自動化

第1節	施設園芸のスマート化	156
第2節	小型スマートロボット	162
第3節	スマート農業の農作業安全	170
第4節	スマート農業の経営効果	178
第5節	スマート土壌診断技術	188
第6節	国外のスマート農業	194

おわりに	198
------	-----

付録	204
----	-----



就業人口の減少と高齢化

さらに、「農業従事者の高齢化」も進んでいます。基幹的農業従事者のなかで65歳以上が約70%を占めているのに対し、49歳以下が約10%と、年齢構成が非常にアンバランスな状態になっています。高齢化によって離農者が出て、先に述べたように新規の参加者が少ないため、就農人口が持続的に減少していく負のスパイラルに陥っているといえるでしょう。

日本農業に影響を与えるさまざまな環境的要因

また、圃場への一律散布を前提とした従来の化学農薬依存の防除方法は、病害虫の薬剤抵抗性を高めてしまうことが指摘されています。さらに、先に述べたような近年の気候変動にもなって病害虫の発生パターンが変化

経営耕地面積が減少しているが、それ以上に農業就業人口の減少が激しい。

2 記録的な豪雨や台風による被害の例

[illegible]

図 3 日本農業を取り巻く問題点

- 担い手の減少、高齢化による労働力不足
- 温暖化による豪雨や台風による大規模災害
- 化学農業に依存した防除体系による病害虫の薬剤抵抗性の発達
- 気候変動による病害虫発生パターンの変化
- 化学肥料原料の海外依存によるコスト上昇



豪雨後の水田

このような問題点に対し

- 生産性向上に加えて、**環境**にも配慮した**持続性の高い農法**への転換
- **SDGs**や環境への対応強化

しており、それに対応した防除体系を構築する必要性が高まっています。

一方で、化学肥料の過剰な使用は、その原料を海外に依存している現状から、最終的に生産コストの上昇を招く原因ともなっています。

日本の農業を取り巻くこうした問題とそれらに対する取り組みをまとめると、図3のようになります。

農業の生産性を向上させると同時に、環境にも配慮した持続性の高い農法への転換が望まれており、これは近年の「SDGs（持続可能な開発目標）」への取り組みとしても求められています。

つまり、原料や資材、栽培・製造といった食料生産分野の全プロセスへの関心が高まっており、農業の生産現場でも環境に対する意識が求められているのが現状なのです。

さまざまな課題の打開策としてのスマート農業

日本農業のこうした現状を打開する方法の1つとして現在推進されているのが「スマート農業」です。スマート農業は、ロボット技術やICT（情報通信技術）、AI（人工知能）、IoT（モノのインターネット）などの先端技術を用いることで、農業をよりsmartに（賢く）しようという考え方です（写真1～3）。

たとえば、トラクターやコンバインなどの農作業車両をロボット化することができれば、省人化が実現できて人手不足の解消につながりますし、農作業を効率的に進めることで空いた時間に他の仕事ができるようになり、軽労化にもつながります。そして、ICTを活用することで農作業の履歴の閲覧や圃場の管理が容易になれば事務仕事の省力化を図ることがで

写真 1～3 スマート農業



写真 1

監視のもとに稲の苗を植え付けるロボット田植え機



写真 2

ロボットの農機を遠隔から監視。作業状況や記録のほか、土壌の状態など圃場に関する管理なども行える

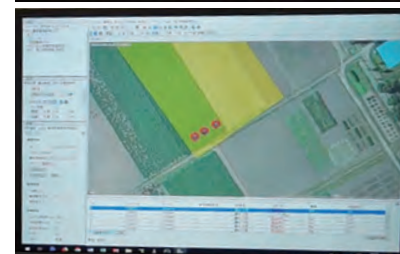


写真 3

人工衛星によるリモートセンシングの画像。土壌の状態や作物の生育状況などを分析したデータを地域で共有できる

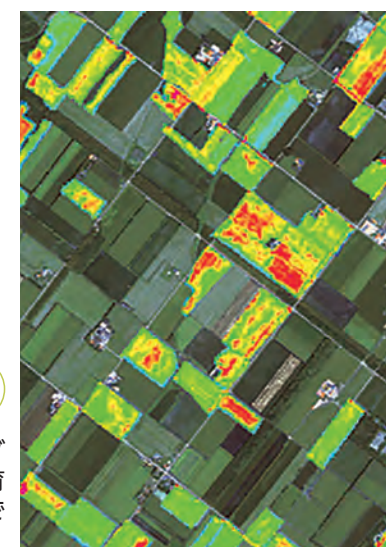


写真 4～7 スマート農業の研究を牽引する北海道大学

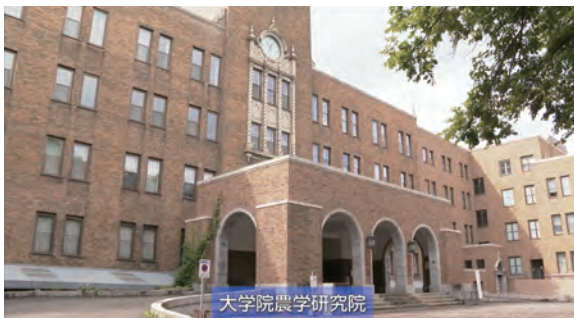


写真 4

北海道大学
大学院農学研究院

写真 5

北方生物圏フィールド科学センター



き、またビッグデータ化されたデータの活用によって、農業の知識や経験を多くの農業従事者で共有し、ひいては経験がない若い人の新規参入のハードルを下げることに寄与すると期待されています。

スマート農業はいま、さまざまな実証実験によってその実用性が確認されており、その一部はすでに実際の農業現場で活用されています。

研究開発の最先端の成果を本書に

スマート農業の研究開発は、国内外で精力的に進められています。

北海道大学(写真4～7)では、ロボットトラクターやその周辺技術についての開発の他、作物の生育や病害虫のセンシング(観測)技術、収穫やその管理作業の高度化など、スマート農業に関するさまざまな研究や開発、

写真 6

スマート農業教育研究センター



同大学は農林水産省の令和4年度スマート農業教育推進委託事業の「スマート農業教育の拠点校」に採択され、この2023年には新たな研究開発拠点「スマート農業教育研究センター」を開設した。スマート農業は、大学をはじめとする研究機関のほかに農機メーカーやICT関連企業なども加わり、産・官・学が一体となって研究開発や普及事業が推進されている。

写真 7

センター1階のロボット格納庫



そしてその実証実験を行っており、本書は、その成果をもとに制作されたビデオ教材「スマート農業オンライン講座」の内容をもとに作成されています。



スマート農業は、先端技術に基づいた「賢い（スマート）農業」です。このため「基礎編」では、GNSSや車両ロボット、人工知能（AI）など、スマート農業を支えている先端技術ごとに節を構成して解説しています。「基礎編」をがんになれば、スマート農業ではどのような先端技術が使われているのか、なぜその技術が必要なのかを理解できるはずです。まず、「基礎編」でスマート農業の基盤となっているさま

ざまな技術を理解しましょう。

各節で取り上げたさまざまな技術は単独で存在しているわけではありません。たとえば「車両ロボット」は、「安全センサ」や「人工知能（AI）」などがあって、初めて有効に活用できるようになります。つまり、各節を個別に理解するのではなく、関連性を意識して読み進めていただくのが、スマート農業の技術体系理解への早道です。





GNSSとはなにか

カーナビやスマートフォンの地図アプリなど、私たちの生活では幅広く「位置情報」が利用されています。これはスマート農業でも同じです。スマート農業では、省力化・効率化のため無人の車両ロボットを利用しますが、これら車両ロボットは、自分が圃場のどこにいるのかを常に把握しながら作業を進めます。また、場所ごとの作物の生育状態や肥料不足などの情報も、位置情報がなければ正確に把握できなくなります(図1)。

こうした位置情報を提供するために高精度で位置を計測する測位システムのことを「GNSS (Global Navigation Satellite System : 全地球航法衛星システム)」といいます。これは上空の人工衛星を利用して位置を測定するもので、アメリカのGPS以外にも、ロシアの「GLONASS^{グロースナス}」、ヨーロッパの「Galileo^{ガリレオ}」、そして日本の「QZSS (準天頂衛星システム)」などがあります。これら衛星を用いた測位システムを総称して「GNSS」と呼んでいます。



GNSSではどのようにして位置を計測しているのか

たとえば、自分の家から歩いて5分(300秒)の距離にコンビニがある場合、歩く速さが1m/秒ならば、コンビニまでの距離は、「速さ(1m/秒)×時間(300秒)」から300mとすぐにわかります。

GNSSの位置計測もこれと同じ原理です。人工衛星から発信される電波には、「どの軌道にある、どの衛星から、何時何分に電波が送信されたか」や、「その衛星は今、どこにいるか」といった情報が載せられています。そして地上でこの電波を受けたときに、自分が持っている時計の時刻と、その電波に載せられていた時刻との差から、「電波がとどくまでに、どれくらいかかったか」が計算できます(電波の速度は、約30万km/秒)。

こうして人工衛星との「距離」がわかりましたが、これではいま自分がいる「位置」が1か所には定まりません。「位置」を知るには、使う人工衛星を3つに増やします(図2)。

紙の上ではこのように簡単なのですが、私たちは「高さ」がある「3次元

図1 位置情報はなぜ必要か

カーナビや地図アプリ

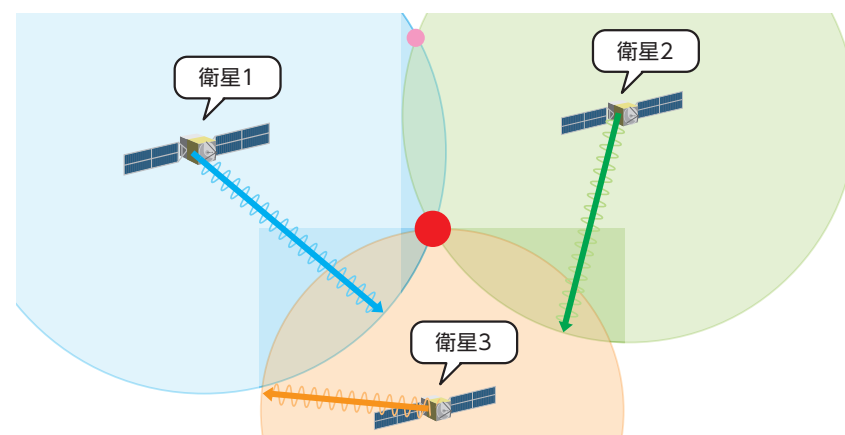


いま自分は
どこに
いるのかな?



ふだんの生活で身近に活用している位置情報は、スマート農業でもドローンや車両ロボットの運用などで重要となる。

図2 計測原理



「衛星1」と「衛星2」を使い、そこからの距離がわかれば、電波を受け取った自分の位置は、「2つの円上にある2つの点のどちらか」というのがわかる。そして「衛星3」からの電波を受け取ることで、「3つの円が交わる大きな赤点の場所」にいることがわかる。

空間」に存在しています。そこで4つ目の衛星を利用すれば、地球上の3次元の位置(地図上の位置に加えて高度)が計測可能となります(図3)。

誤差について

人工衛星に搭載されている時計はとても正確ですが、それでも少しズレることがあります。また、地上の受信機に入っている時計はさらに時刻がズレることがあります。つまり、こうしたズレを含んだ時刻をもとに割り出した距離には「誤差」が生じます。

時刻のほかに人工衛星の軌道のズレや複数の衛星の位置関係のズレ、また地球をとり囲んでいる対流圏や電離層の影響による電波の速度の低下、そして地上の受信機のまわりに存在する障害物による「マルチパス(電波の跳ね返り)」などによっても誤差が生じます。

誤差は「範囲」を持っています。たとえば、的をねらってピストルを撃つと、弾は必ずしも的に命中するとはかぎらず、その周辺の一定の範囲に散らばります。このように誤差というのは「点」ではなく、ある程度の「範囲」を持ち、その面積が小さいほど正確だといえます。たとえば、図4のように人工衛星が上空に集まっている場合と離れている場合を考えてみましょう。どちらも同じ程度に距離の誤差を含んでいるとすると、衛星が近い場合の方が、各々の衛星が描く円の弧によってつくられる距離誤差の範囲面積が大きくなり、精度が低くなります。

GNSSを用いた測位方法

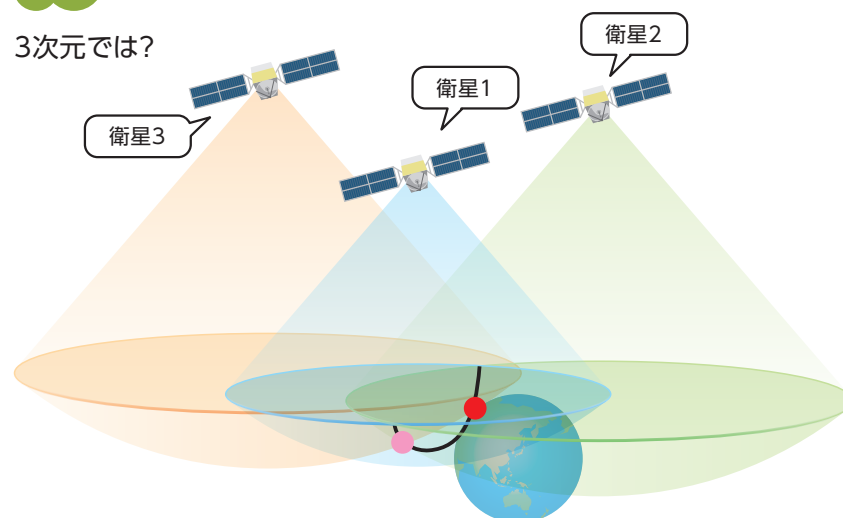
「単独測位」と「相対測位」

GNSSを用いて位置を計測することを「測位」といい、その方法を整理すると図5のようになります。

まず、今まで見てきたように1つの受信機で位置を計測する方法を「単独測位」といいます。ただし、単独測位では精度が不十分である場合には受信機を2つ使って精度を高める方法がとられ、これを「相対測位」と呼ん

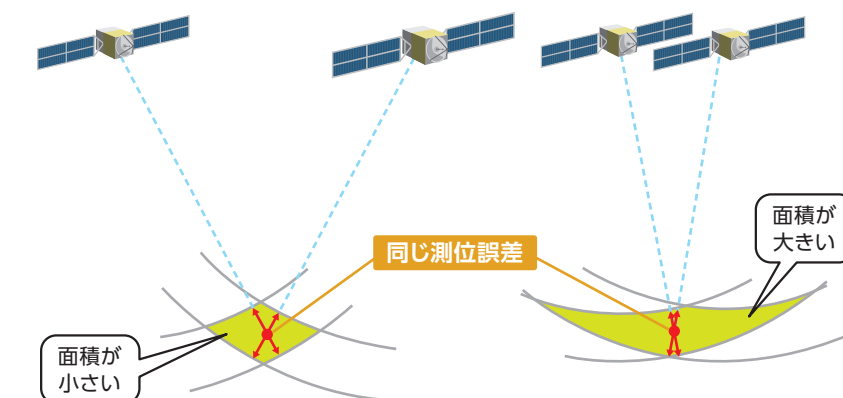
図3 計測原理

3次元では？



「衛星1」と「衛星2」が交わる部分は平面の「円」であらわされ、「衛星3」を加えることで、図のように赤い点2つがわかるが、特定の「位置」にしばらく込むためには、4つ目の衛星が必要になる。

図4 測位精度の指標



同じ測位誤差でも、衛星の配置によって精度は影響を受ける。その度合いをあらわす指標として、「精度低下率(DOP(ドップ))」があり、「値が大きくなるほど精度が悪くなっている」と判断される。DOPには「HDOP(水平の精度)」、「VDOP(垂直の精度)」、「PDOP(位置の精度)」の3つがある。

でいます。これは、固定している受信機「基地局(または基準局)」と、位置を知りたい地点にもう1つの受信機「移動局」を置いて計測して、基地局で出した補正データを移動局に送信することで、移動局の位置を補正して精度を上げる方法です(図6)。

ディファレンシャル測位(DGNSS)

相対測位では、基地局の補正データで移動局のデータを補正しましたが、ディファレンシャル測位は基地局と移動局の両方で単独測位を行って、基地局でその2つの差を割り出し、新たな補正情報を移動局に送る方法です(図7)。

今までは、図のように近くに基地局を設置する必要がありましたが、高精度な測位の必要がなく、コストを抑えたい場合は、補正信号を直接人工衛星から受信する方式などが採用されています。

干渉測位：スタティック測位とRTK測位

人工衛星からの電波の速度は一定ではなく、そこで距離の誤差が生じてしまいます。そこで、「複数の電波の波の数(周波数)」や「それらの波のズレ」を調べることで補正して正確な位置を計測する方法がとられます。いわば、電波に載せられている時刻や位置などの情報ではなく、「電波そのもの」を利用して測位するわけです。

干渉測位と呼ばれるこの方法は2つに分類されます。

まず、一定の時間をかけて、移動する衛星からの波の数を正確に数える「スタティック測位」です。ある衛星からの電波の波の数を時間をかけて計測すると、波の数に差が出てきます。その差から正確な位置を補正するわけです。スタティック測位は高精度ですが、長時間、定点で測らなければならないという難点があります。

もう1つは「RTK測位(リアルタイムキネマティック測位)」で、こちらは1つではなく複数の電波の波の数を計測して、それらのズレから瞬時に波の数を推定する方法です。スタティック測位よりも短い時間での測位が可能で、ロボット農機など移動する物体の測位にはこのRTK測位が用いられます。測位の精度は2cm(500円玉サイズ)で、受信側が携帯電話を使

図5 測位方法の分類

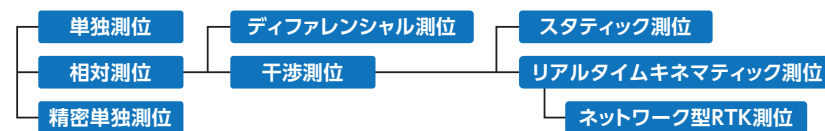
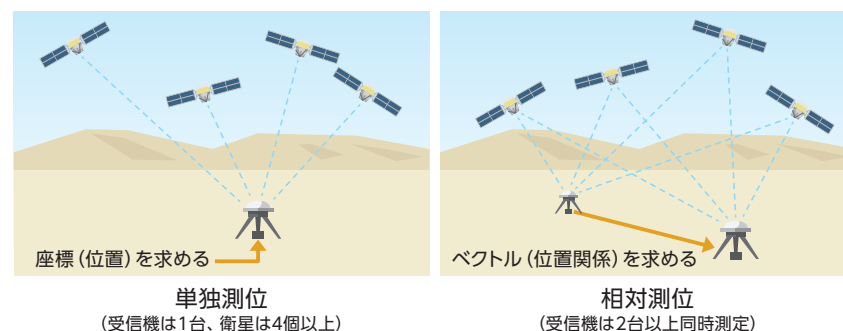
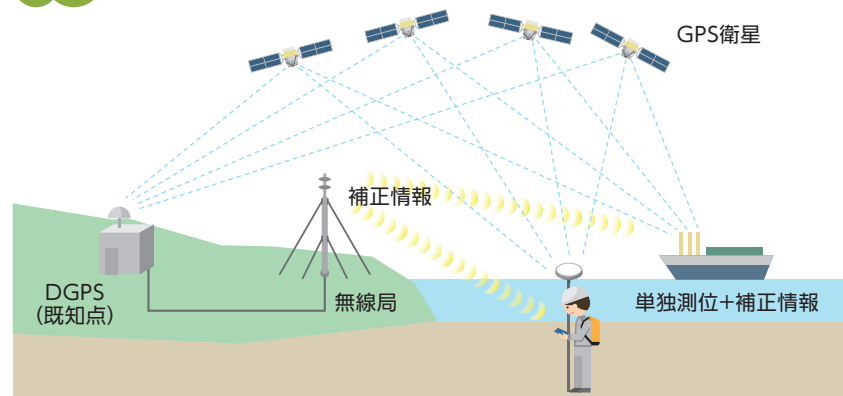


図6 単独測位と相対測位



単独測位は1つのGNSS受信機だけを使うが、相対測位は正確な位置がわかっている基準局からの相対的な位置関係によって測位の精度を高める。

図7 ディファレンシャル測位



2点の相対的な関係を用いるので相対測位だが、基地局と移動局の両方で単独測位を行ってから相対的な誤差を出し、補正データを算出する。誤差の範囲は数m~50cm程度。

って位置を確認することも可能です。ただし、RTK測位は複数の電波の周波数を受信できる高価な受信機が必要で、基地局との距離は10km以内という制約があります。

ネットワーク型RTK測位

干渉測位は2つの受信機を用意するのでコストがかかり、距離が離れるほど時間をかけなければ高精度の測位ができなくなります。これに対して「ネットワーク型RTK測位(ネットワーク型リアルタイムキネマティック測位)」は、補正信号を基地局からではなくネットワークから得る方法です。そのなかで最も使用されているのが「VRS方式」と呼ばれるもので、国土地理院が日本全国に置いた約1300点の「電子基準点」の情報から得られた補正信号を配信事業者がネットワークを介して農場の移動局に送信します(図8)。

精密単独測位

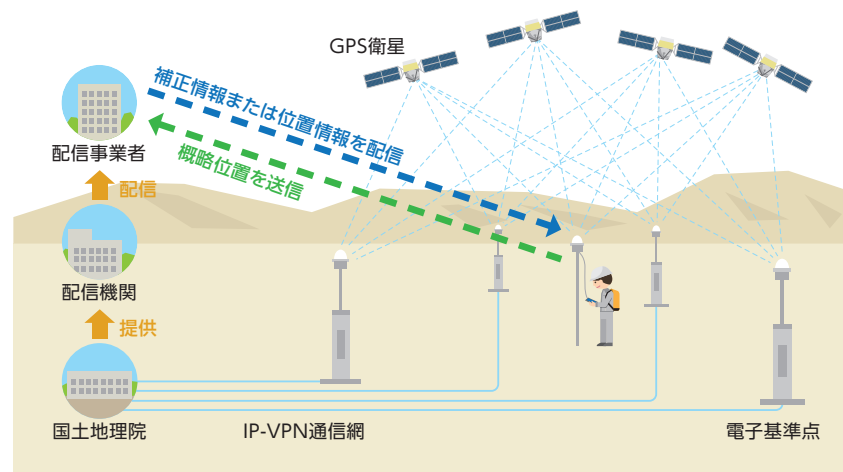
ネットワークが使いにくい場所でも測位ができる方法です。通信衛星からの補強信号を用いて、単独で測位精度を高めるもので、^{エスラス}「SLAS」や、誤差がセンチメートル級の^{シーラス}「CLAS」、日本が開発した^{マドカ}「MADOCA」など、いくつかの測位方法があります。たとえば、日本の準天頂衛星(QZSS)「みちびき」は、ほかのGPS衛星の補完や電波の改善、補正信号の送信などを行ったりして、測位精度を高めています。

現在の問題点と利用の際のポイント

GNSSの利用例としては、ドローンや車両ロボットがあります。防除作業などに用いられる飛行型ドローンの場合は機材の積載量に限界があるためにRTK測位よりも単独測位のGNSSが使われることが多く、いっぽう車両ロボットでは機材を積むことができ、さらに移動時に作物を傷つけないようにしなければならないため、高い精度で測位できるRTK測位やネットワーク型RTK測位が用いられます。

しかし、農作業を行う環境には、GNSSにとって不都合な要因が少なく

図8 VRS方式



国土地理院が設置した電子基準点で計測された情報は、「IP-VPN通信網」を通じて国土地理院に集められる。移動局が正確な位置を知りたい場合、どのような補正信号になるかを配信事業者が計算し、ネットワークを介して移動局に送信する。これも携帯電話を用いて測位できる。国土地理院の電子基準点の利用は無料だが、配信事業者によるデータの利用は有料となる。

ありません。たとえば防風林によって人工衛星からの電波がさえぎられることがありますし、都市部から離れた場所では、ネットワーク型RTK測位で使用する携帯電話の電波が途切れることもあります。

GNSSを導入する際には、精度や特性などはさまざまなので、目的や予算に合った方式を選び、すでに導入している場合はその特性を踏まえたうえで適切に利用することが重要といえます。

高まる車両ロボットの必要性

たとえば、水稻栽培では、「耕耘→代^{しろ}かき→田植え→収穫」という一連の作業があります。これを昔は人の手によって行い、現在では農業従事者がトラクターなどの農作業機を操作して行っています。しかし現在では農業分野は人手不足で、農家自体も減少傾向にあります。こうした状況への対策として、スマート農業では人間の手を必要とせずに農作業を行う「車両ロボット（ロボット農機）」の導入が考えられています。

一方、スマート農業は「データにもとづいた農業」といえます。このため、車両ロボットは作物の育成状況や気象状況などのデータに応じて適切な作業を行えなければなりませんし、さらに作物の品質などを場所ごとに正確に計測できる機能も求められています。

車両ロボットに必要な技術①——ナビゲーション

車両ロボットに最低限必要な技術には、「ナビゲーション」「マップ」「ソフトウェア」の3つがあります（図1）。

この他にも車両ロボットの状況を確認する「ユーザーインターフェース」や「安全センサ」「監視装置」も搭載されますが、ここでは車両ロボットを最適に稼働させるための基本である上記3つについて説明します。

「位置」はGNSSを用いて知る

ナビゲーションは、車両ロボットが自分の「位置」や「方位（方向）」を知るために必要となります。

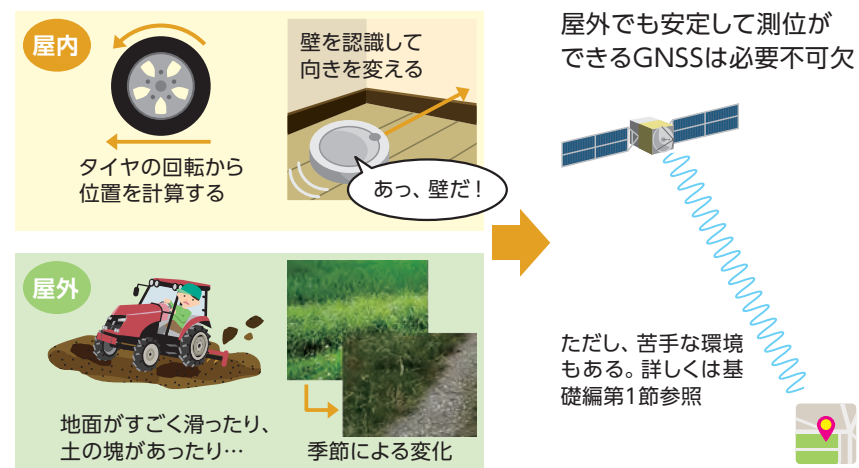
車両の場合はタイヤの回転数を数えて位置を把握する方法もありますが、畑や田圃で使用する農業用車両ロボットは横滑りしたりするので、タイヤの回転数は使えません。また、センサでまわりの環境を認識する方法も、四季によって環境が変化するので困難です。このため、高精度の位置を検出できる「GNSS（全地球航法衛星システム）」が用いられます（図2）。

図1 車両のロボット化の技術



「ナビゲーション」は、自分の位置や方位などを知ること。「マップ」は、圃場の位置や形状をあらわし、車両がどこをどのように走行し、どのように作業すればよいかを示す。そして「ソフトウェア」は、これらのことを適切に行うために車両の動作を制御する。

図2 ナビゲーション（位置の計測）



農業用車両ロボットは不整地で活用されるので、タイヤなどの回転数で位置を測ることは困難。また、屋外は季節や人的要因などで周辺環境が変化するため、掃除ロボットのように位置を把握する目的でセンサを使用することも難しい。

「方位」を知るには3つの方法がある

「位置」と同じく、「方位」も重要な要素となります。たとえば、左右にハンドルを切って方向を変える場合に、自分が今どの方向を向いているのか、あるいは目標地点に対して、どれくらいズレて向いているのかがわからないと、正確な動きができません。

つまり、車両ロボットを走らせるためには、車両の向きや目標の方向といった方位も非常に重要なのです。この方位を知る方法には「GNSS」「地磁気」「ジャイロ」の3つがあります(図3)。

第1節でも説明したように、GNSSは「位置」を測定しますが、それを応用して、人工衛星のデータから2つの位置を計測し、その関係から方位を計算して把握します。

ただしこの方法は、舗装路面のような整備されたところを走行する場合には有効ですが、横滑りするような整地されていないところには向いていません。そもそもGNSSのこの使い方は、「車の向いている方向に正しく移動すること」が大前提なので、横滑りのような不測の事態がひんぱんに起こると誤差が大きくなっていきます。とはいえGNSSは高精度に「位置」を測れるので、2つのアンテナを用いて正しい「方位」を検出して対応します。

地磁気を測る方法もあります。登山などで方位磁石を使ったことがある人もいるかもしれませんが、原理は同じです。

地磁気のメリットは、GNSSと同じく地球上のどこでも測れることです。北向きに対する方位が計測できるため、人が地図上で理解しやすいというメリットもあります。

ただし、地磁気は非常に弱いので、近くに金属がある場合や高圧電線がある場合は、その影響を受けやすいというデメリットがあります。

最後のジャイロは、回転している物体は外から力を加えないかぎり自転軸を変えないという性質(ジャイロ効果)を利用したもので、この変わらない回転軸方向との差から「どれくらい向きが変わったか」を検出して方位を導きます。スマートフォンの縦横の向きを検出する際にも、ジャイロの原理が使われています。

図3 ナビゲーション(方位の計測)

GNSSを使う



横滑りの発生する農業用車両には不向き



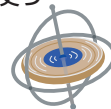
地磁気を測る



高圧電線や鉄筋の入ったコンクリート畦畔が影響する



ジャイロを使う



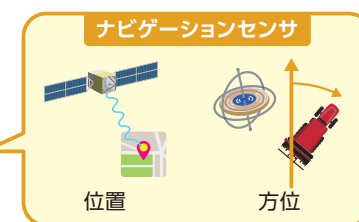
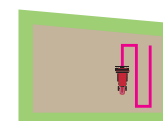
角度変化を検出するのには向いているが、絶対的な方位計測は工夫が必要



ナビゲーションには図のような3つの方法がある。それぞれ一長一短があるので、組み合わせたり、状況に合わせた方法を採用するなどの工夫が必要となる。

図4 マップ

どこで、どのように作業をするのかを地図として表す。



マップにより、目的の作業経路に沿って車両を走行させる。
ただし、マップ作成には注意が必要。



Googleマップや国土地理院など、一般的な地図ではなく、車両ロボットと同じ測位方式のものを使うか、車両ロボット自身にマップを作成させる。



ナビゲーションによって、位置や方位を計測。そしてマップによってどこで、どのような作業を行うかを車両ロボットが把握し活動を行う。ただし、マップをつくるときには、注意が必要となる。

GNSSや地磁気と違って、ジャイロでは「北に対してどれくらい向きが変化したか」を検出できません。「そのときの変化の程度」はわかるのですが、絶対的な方位の計測には向いてないのです。

しかし、農業の現場で用いる上ではジャイロはGNSSや地磁気よりも環境の影響を受けにくいので、現在ではGNSSや加速度センサなどと併用して、車両ロボットやドローンの姿勢制御などに用いられています。

車両ロボットに必要な技術②——マップ

ナビゲーションセンサで「位置情報」と「方位情報」が得られれば、あとは地図情報と照らして、目的の作業経路に沿って車両を走行させることができます。この地図情報は「マップ」と呼ばれています(前ページ図4)。現在市販されている車両ロボットは圃場の中で利用することを前提としていますが、圃場から圃場へと移動する車両ロボットも研究されています。

このマップとしてはGoogleマップや国土地理院が発行している地図が使えるのですが、測位の方法が異なっているため注意が必要です。それらの地図がGNSSを用いたRTK測位によるものだったとしても、補正信号が異なるなどの場合があり、誤差が出るかもしれません、おすすめできません。

ドローンの飛行経路作成では多少の誤差も許されますが、車両ロボットの場合はわずかでも誤差があると畦畔を乗り越えたり用水路に落ちたりといった事故にもつながります。このため、マップの作成には使用する車両ロボットと同様の測位方式を用いるか、車両ロボット自身で圃場を走行してその軌跡から圃場区画マップを作成するのが一般的です。

車両ロボットに必要な技術③——ソフトウェア

「位置」と「方位」が計測され、車両を走らせるための目標経路がマップから与えられると、車両ロボットの中の「ソフトウェア」が、前・後進や停止、エンジン回転数や変速機での速度の調整、方向転換などの操舵を制御します。

ソフトウェアはこの他、車両に装備されている農機具の昇降や、トラク

図5 有人車両と車両ロボットとの比較試験(昼間)

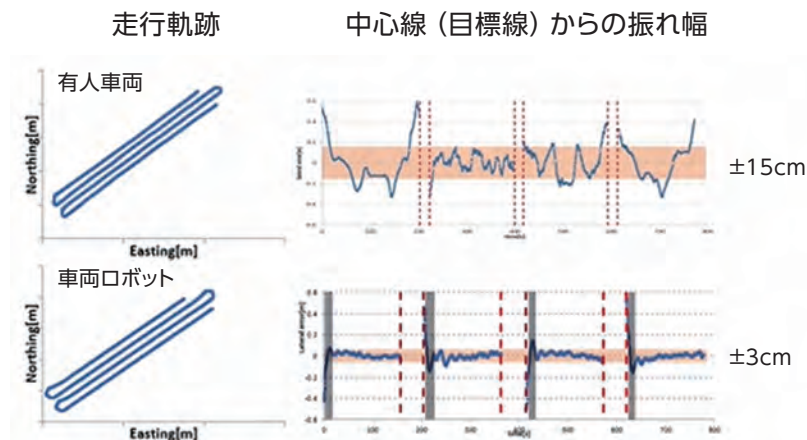


図6 有人車両と車両ロボットとの比較試験(薄暮～夜間)

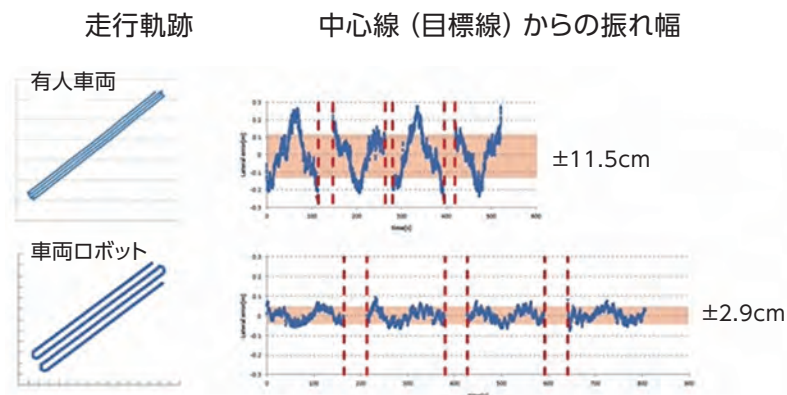


図7 車両ロボットの運用

農林水産省
「ロボット農機の自動走行に関する安全性確保ガイドライン」



圃場外からタブレットで操作・監視



伴走車両から操作・監視

縦走作業



監視

播種期
前走：ロータリー
追走：施肥・播種
収穫期
前走：チョッパー
追走：排水改良

並走作業



監視

同一作業を2台で行うことで作業効率を向上させるだけでなく、土壌踏圧低減にも効果があります。

現在のガイドラインでは、監視者が圃場の近くで車両ロボットを操作・監視する必要がある。将来的には、1人の監視者が2～4台、またはそれ以上の車両ロボットを運用できるようになり、省力化・効率化がさらに向上すると見られている。

きます。

スマート農業における車両ロボットは、農業の効率化や安全性を向上させるツールといえるでしょう。

ターならPTO（パワーテイクオフ）の切り替え、さらに取り付けられた安全センサによる危険察知からの緊急停止などの制御を行います。



有人車両と車両ロボットとの比較試験

ベテランの農業従事者が操縦する有人車両と車両ロボットが代かき作業^{しろ}を行ってその結果を比較する実験が行われました（前ページ図5、6）。試験は昼間と、薄暮～夜間にかけて行われました。代かきでは水面によって作業跡（経路）が隠れてしまうために、走行する目標経路が視認しにくくなります。有人車両は、昼間はGNSSのガイダンスを用いずに、薄暮～夜間ではライトのみを頼りに、いずれも目視で行っています（安全優先で行うようお願いします）。

その結果、両者の走行軌跡にあまり違いはありませんでしたが、走行経路の中心線（目標線）からの横ズレの度合いを見ると、昼間の試験では有人車両では平均±15cmの変動幅が見られたのに対し、車両ロボットでは±3cmのズレにおさまりました。さらに薄暮～夜間という視認しにくい状況で行われた試験では有人車両±11.5cmに対して車両ロボットでは±2.9cmとなりました。



車両ロボットの現状と将来

農林水産省で規定された現在の「ロボット農機の自動走行に関する安全性確保ガイドライン」では、車両ロボットの運用は目視監視できる範囲で許可されており、監視者は圃場の外でタブレット端末を用いて作業指示を出したり、緊急停止させたりしています。または、有人車両が無人口ボットの周辺で作業を行いながら作業監視を行います（図7）。しかしそれでも、すべてを有人車両が行う場合の2倍に近い作業効率を実現できます。

将来は、1人の監視者が複数の車両ロボットを同時に運用できるようになり、さらなる省力化・効率化が期待されています。また、天候などの事情から徹夜で農作業にあたらなければならないような状況でも、車両ロボットを稼働させれば、作業者を危険にさらすことなく安全に行うことがで

国際標準規格「ISOBUS」とは

たとえば、あるソフトを使いたいのにA社製のパソコンでしか使えず、自分が使用しているB社製のパソコンでは使えないということがよくあります。似たようなことが、トラクター本体と、そこに取り付けられるプラウやプランタなどの作業機との間でも起こりつつあります。

昔は作業機の操作を熟練の農業従事者が行っていましたが、近年では効率化・省力化のため、作業機に電子制御システムが搭載されて自動で作業が行われるようになりました。そして現在では、農作業を適切に行うためにトラクターと作業機の間での情報の相互通信が必須となっています。

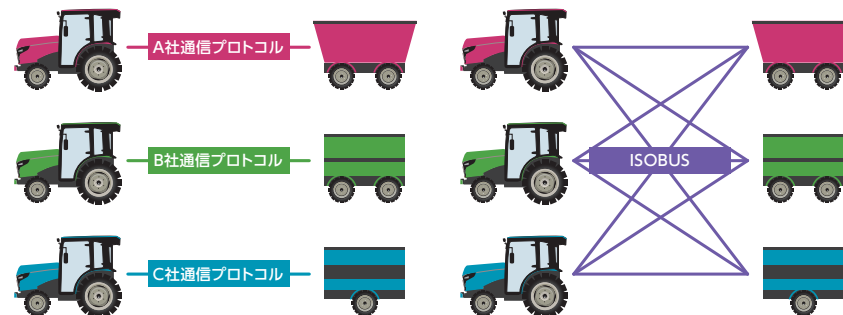
この「トラクターと作業機間の通信」において、世界各国の主要な農業機械メーカーは、すでに通信仕様の標準化に取り組んでいます。日本国内では、トラクターメーカーが販売する製品の通信仕様が共通化されていないため、各メーカーのトラクターに対応した作業機を準備しなければなりません。このため、異なるメーカーの農業機械を相互接続させるための国際標準規格「ISOBUS」の普及が進められています(図1)。

具体的には、ISOBUSは国際的な標準規格を策定している「国際標準化機構(ISO)」が定めた工業規格「ISO11783」をベースとしています。このISO11783は、トラクター向けの車上通信に関する規格で、14もの項目からなっています(図2)。

かなり複雑な規格内容ですが、「1つ1つの製品ごとの具体的な機能はどうすればいいか? どう盛り込めばいいのか?」というような明確化の観点からは十分ではありませんでした。このため国際的な業界団体である「AEF(国際農業電子財団)」が、製品単位での機能を明確化しました。この明確化された機能は「ISOBUS機能」と呼ばれ、こうしてトラクターと作業機間の相互通信が具体的にできるようになったのです。つまり、ISOBUSとは、実際に機能する製品を開発する際にISO11783を適合できるようAEFが定めた、具体的な統一仕様のことを指す呼称なのです。

AEFは、ISOBUSに対応した製品の品質を保証する「ISOBUS認証テスト」という厳格な認証制度を運用しており、合格するとラベルが製品に添付され、ISOBUSデータベースにも製品情報が掲載されるようになります。

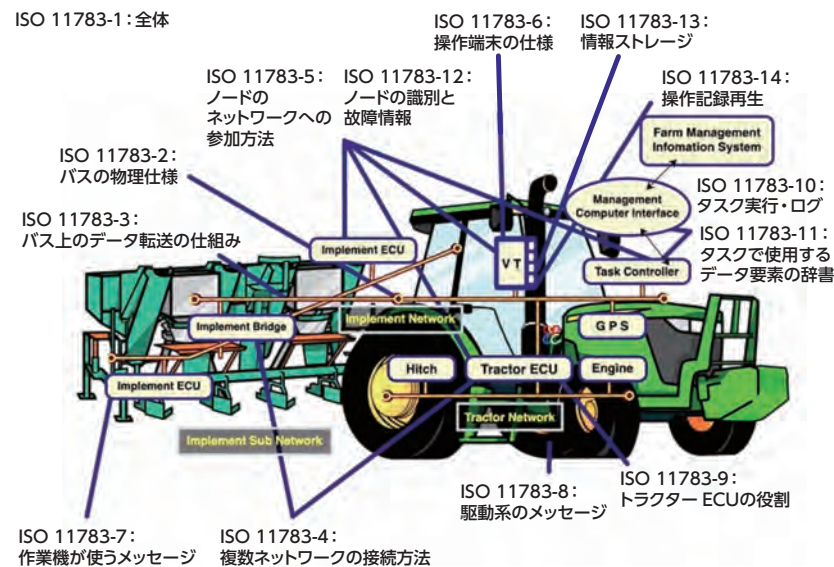
図1 国際標準規格「ISOBUS」



トラクターと電子制御化された作業機の通信が共通化されなければ、メーカーごとに機器をそろえなければならない。

ISOBUSは、通信仕様の共通化によって相互接続が可能となる。

図2 ISO11783



ISO11783は、内容によって14もの項目に分けられている。

ISOBUSのコンセプト

では、ISOBUSはどのようなコンセプトなのでしょう。まずあげられるのは、冒頭でも述べた「相互運用性」です。ISOBUSは、異なる企業のトラクターと作業機を相互に接続して運用できるようにすることが、1つ目のコンセプトといえます。

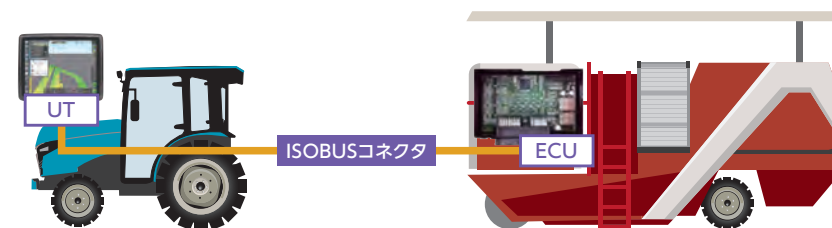
2つ目のコンセプトは「作業機が協調制御の主体となる」ということです。今までは、どちらかというトラクター側が作業機を制御してきましたが、ISOBUSでは作業機が制御の主体となります。

しくみとしては、トラクターの「UT (ユニバーサルターミナル)」という操作端末と作業機の「ECU (電子制御ユニット)」が「ISOBUS コネクタ」によって接続され、情報がやり取りされますが、作業の情報や制御方法は、すべて作業機側のECUにあります。そして、UT (トラクター側) と ECU (作業機側) をつなぐコネクタがISOBUS機能を持っていないと、トラクターと作業機が自由な組み合わせで選べなくなるのです (図3)。作業機とトラクターのあいだでは、作業機の動作や作業の進みぐあいに応じて、作業機側がトラクターのステアリングや走行速度、補助バルブ、PTO (パワーテイクオフ) 機構、ヒッチなどをコントロールするというふうに作業機を中心とした農機の協調制御が行われ、これは「TIM (トラクターインプルメントマネジメント) 機能」と呼ばれています (図4)。

そしてそこでは、「データの相互運用性と、通信仕様のオープン化」が図られます。たとえば人工衛星からの画像情報で作物の生育状況がわかったとします。その情報にもとづいて、圃場ごとに施肥量を変えたり、播種の間隔を変えたりする必要がありますが、その際に用いられるマップ作成ツールが作業機の制御装置とデータの相互運用ができれば、可変施肥や可変播種の作業をスムーズに行うことができます。

また、近年では各メーカーがそれぞれつくっている「営農管理システム」を農家を選び、それを使って経営をしているケースが多くなっています。もし作業機にある作業の記録データを自分が使っている営農管理システムにそのまま入力できれば、作業進捗の管理や分析が効率的になって、経営の高度化・省力化にも貢献します。

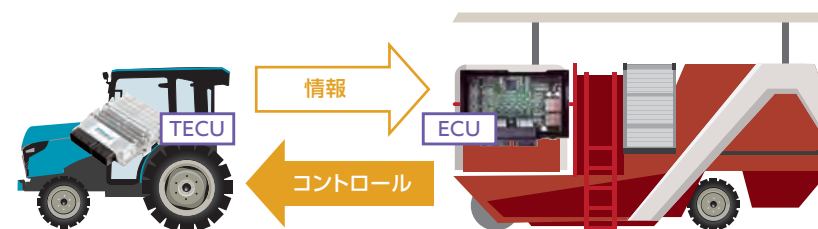
図3 作業機が中心となって農機を協調制御する



市販されているどのターミナル (端末) を用いても、作業機を操作可能となる。さらに、1つのターミナルで異なる作業機や複数の作業機を操作できるようにもなる。

図4 TIM (Tractor Implement Management) ~トラクターと作業機の協調制御~

作業機がトラクターをコントロールする



トラクター側のTECU (トラクター電子制御ユニット) と、作業機側のECUで情報と制御のやり取りが行われる。

つまり、こうしたデータの相互運用性と、通信仕様のオープン化によって、ISOBUSは「経営まで含めた農業全般の高度化・省略化の実現」を目指しています。これがISOBUSの3つ目のコンセプトです。



ISOBUSの機能

ISOBUSは非常に幅広い機能に関係しているので、紙数の都合からすべてを紹介することはできませんが、以下にISOBUSによる主な機能を、1つ1つ具体的に見ていきましょう。

UT モジュール

まず、先ほどで少しふれた「UT モジュール」です。そもそも作業機はターミナル(端末)で操作し、それはUT (ユニバーサルターミナル)も同様です。ただしUTを用いれば、これ1台でISOBUSに対応したさまざまな作業機を操作することができます。さらに異なる作業機や複数の作業機の操作を、ターミナルを変えることなくそのまま使用できるようになります(写真1)。

ISOBUS ショートカットボタンモジュール

トラクターのキャビン内に設置され、意図しない動作が作業機に生じた場合の非常停止などで使用されます(写真2)。

TECU (トラクター電子制御ユニット)機能

「TECU」はトラクターを制御するためのシステムで、トラクター1台に複数搭載されています。

ISOBUSのTECUは、たとえば走行速度、PTO回転数などのトラクター側の情報を、トラクター後部やキャビンにあるISOBUSコネクタを使ってISOBUS採用の作業機に提供します(写真3)。

TC-GEO (タスクコントローラ^{ジオ}GEO)

TC-GEOは、位置情報を利用する機能です。TC-GEO機能を利用すれば、

写真1 UTモジュール



画像: "Terminal", AEF Database,
<https://www.aef-isobus-database.org/isobusdb/app/compatibility/index.jsf>

写真2 ISOBUSショートカットボタンモジュール



画像: <https://agronaplo.hu/nagyvilag/filegl-isb-the-innovative-comfort-off-switch>

たとえば前にも説明したように、作業マップなどを利用しての可変施肥などの作業で位置情報を活用することができるようになります(写真4)。

写真4の下の写真は、人工衛星からのリモートセンシングデータから作成された施肥マップで、生育状況の良い場所は施肥量を少なく、悪い場所は施肥量を多くするよう表示されています。これをISOBUSでTC-GEO機能対応の作業機と連携させれば、実際に精密な施肥を行えます。

タスクコントローラベシク機能

タスクコントロール機能にはいくつかありますが、そのうちの1つである「タスクコントローラベシク機能」は、作業機が実施した作業の総量を記録し、営農管理システムなどとデータを交換する機能で、UTモジュールに搭載されているケースが多いです。経営の効率化・省力化に貢献する機能といえます。

これらの他にも、除草剤などの薬液散布のときにGPS衛星から得た位置情報や、希望に応じてシーダーなどの散布機を自動制御する「TC-SC」など、さまざまな機能がISOBUS対応として存在します。



ISOBUSとロボットトラクターの相互運用

現在、スマート農業による自動化・省力化を実現する方法として、ロボットトラクター(車両ロボット)やISOBUS対応作業機の活用が国内外で進められていますが、市販されているロボットトラクターは、ステアリング操作や作業機の昇降、PTOの回転数、走行速度などを、トラクターが事前に設定した経路で、インターフェースにもとづいた動作で行うようになっており(第2節参照)、ISOBUS機能の作業機との協調制御が可能なものは、一部となっています。

ロボットトラクターによる農作業では、走行中の車体のズレや収穫時などで作物に被害を与える可能性が高いとされています。これらさまざまな問題点を解決するために、作業機との協調制御が必要となりつつあり、ISOBUSの普及が注目されているのです。

写真3 TECU (トラクター電子制御ユニット) 機能

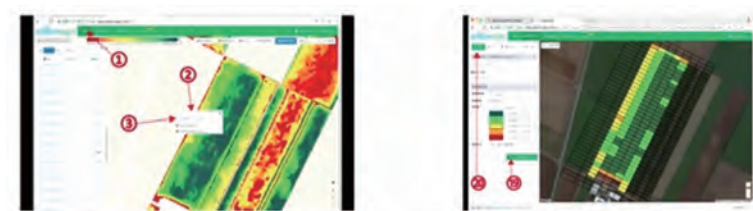


画像: "basic Tractor ECU", AEF Database, <https://www.aef-isobus-database.org/isobusdb/app/compatibility/index.jsf>

写真4 TC-GEO (タスクコントローラ^{ジオ})



画像: "Auxiliary Control", AEF Database, <https://www.aef-isobus-database.org/isobusdb/app/compatibility/index.jsf>



画像: "施肥マップ作成ツールの使い方", スペースアグリ株式会社

安全性の確立は車両ロボット運用の大前提

私たちが自動車を運転するとき、目や耳（視覚と聴覚）を使って衝突を未然に防いだり、接触したときの衝撃を感じ取って自動車を急停車させたりします。いわば人間は、目や耳、触覚などをセンサとして危険を検知し、自動車を安全に運転しているのです。

スマート農業で使用される無人の車両ロボットも、さまざまな農作業や圃場などへの移動の際に、人に接触したり障害物に衝突したりしないよう安全性が保証されなければなりません。また、畑や田を耕すロータリープラウなど作業機の昇降を行うときも、近くに人がいないかどうかを車両ロボットが検知する必要があります（写真1）。

これらのことから、自動車を運転するときの人間の目や耳、体感と同じ役割をする「安全センサ」が、車両ロボットには必要になります。

安全センサに求められる機能と種類

安全センサは、目標物（人や障害物）までの距離を測定する必要があります。自動車の運転でも、遠くで歩行者を発見できれば、距離に応じて速度を落とすかどうか、ハンドルを切るかどうかなど、対処行動を選ぶことができます。つまり、目標物までの距離がわかれば、そのあとの行動を決めることができるのです。

また、接触したという異常事態の場合では急ブレーキ、つまり緊急停止を行います。

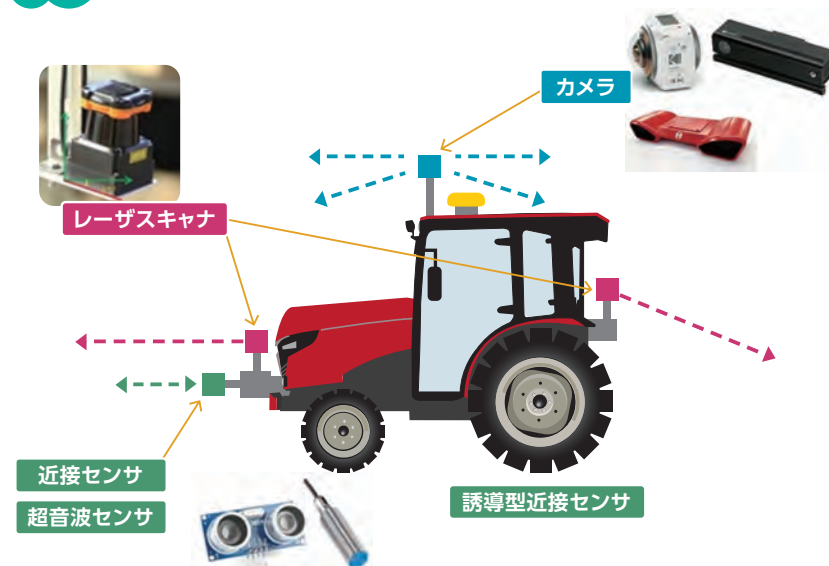
これらのことから、車両ロボットの安全センサは「距離の測定」と「接触の察知」が大切になります。

ロボットトラクターなどで使用されている安全センサの例として、機能別に「レーザスキャナ」「カメラ」、そして接近や接触を検知する「近接センサ」があり、近接センサには「超音波センサ」や「誘導型近接センサ」などが使われます（図1）。それぞれの機能や特質、メリット・デメリットを見ていきましょう。

写真1 障害物の検出と衝突回避



図1 安全センサ



レーザスキャナ

レーザスキャナの原理としくみ

「レーザスキャナ」は、送信機からレーザビームを発生させて目標物に当て、その反射したレーザビームを受信機で受け取って距離を推定する装置です(図2)。

光は波の性質を持っています。太陽の光はいろいろな周波数の光で構成されています。プリズムを通すと周波数ごとにきれいな虹色に分離されるのを小学校の理科の実験で観察した人もいでしょう。これに対し、レーザ光は周波数がほぼ一定にそろえられており、1点に収束させることができるため、精度の高い測定が可能となります(図2)。

レーザスキャナは、「スキャナヘッド」という部位を回転させることで周囲にレーザを送信します(図3)。図ではスキャンする範囲を270°としています。もちろん360°をスキャンすることも可能です。

距離測定の手順は、以下のように実施されます。

- ①距離計の送信機からレーザビームが発射される。
- ②ビームがターゲットに跳ね返り、距離計の受信機に戻る。
- ③ビームを放出して帰ってくる時間 t を測定する。
- ④測定した「時間 t 」と、「速度 c 」を用いて「距離 d 」を算出する。

「速度 c 」は光の速度(30万km/秒)を用いて、以下の式で距離を算出します(2で割るのは、往復で2倍の距離となっているため)。

$$d(\text{距離}) = c(\text{速度}) \times t(\text{時間}) / 2$$

レーザスキャナの長所・短所

レーザスキャナは、中距離の障害物を検出するのに適しており、通常トラクターなどの前部に取り付けられますが、作業機周辺の安全性確保のため、後部にも取り付けることができます。

レーザスキャナの長所としては、「振動の影響を受けない」「中距離(約10m)の測定で良い精度が得られる」「コンパクトなサイズなので簡単に

図2 レーザスキャナ

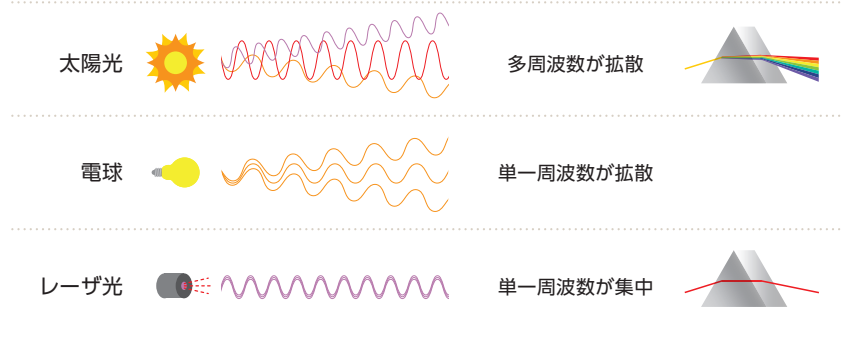
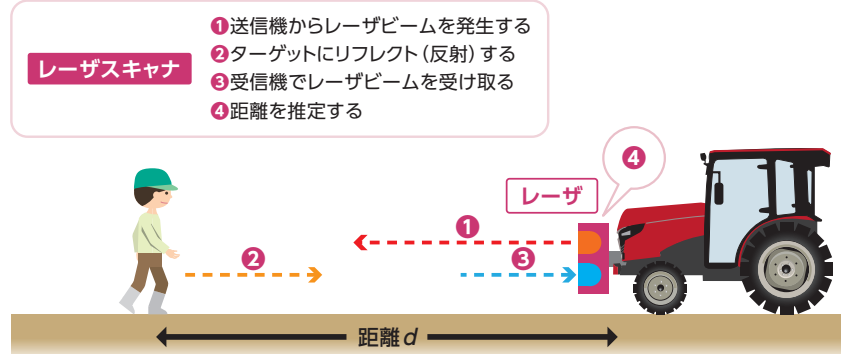
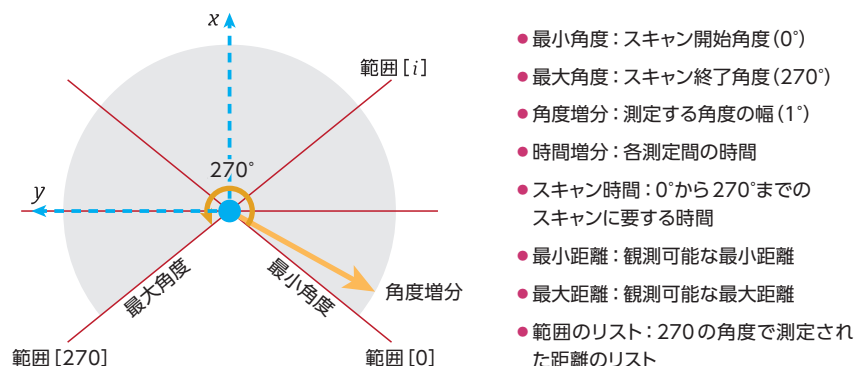


図3 レーザスキャナの特徴



設置できる」などがあげられます。

短所としては、「埃や雨の影響を強く受ける」「カメラに比べてコストが高い」「壊れやすく、修理はほとんど不可能」などがあげられます(図4)。

カメラ

カメラの原理としくみ

近年のデジタルカメラ(RGBカメラ)は安価となり、さらに解像度も上がっています。私たちの肉眼のように、カメラは目標物や背景を映像としてとらえますが、肉眼で見たものが何であるかを判断するのは、私たちの「脳」です。これに対して、安全センサとしてのカメラは、近年大きな発展をとげた「AI(人工知能)」が、映っているものが人や障害物かどうかをリアルタイムで判断できるようになっています(図5)。もともと画像認証は、さまざまなAIの仕事の中でAIが得意とする分野です。

AIには、あらかじめ人や動物などの障害物の膨大な画像を読み込ませて学ばせておきます。そして映ったものをネットワークを介してとらえ、画像内にある物体を識別するわけです(図6)。

ただしAIを用いるとき、十分な速度で認識のアルゴリズム(ある仕事をするときの手順)を実行するためには、高性能のコンピュータが必要となります。

3D画像で距離をつかむ

カメラによる距離の計測に関しては、「キャリブレーション(さまざまな調整などを行う標準器)」などを用いてカメラの高さや傾斜角度、平面での距離などの要素を計算することで、目標までの距離を測定することが可能となっています。

一方、人間の目と同じように、左右の目で奥行きを測る「ステレオビジョン」という方法を用いることによっても距離を測れます。「ステレオビジョンカメラ」は、三角形とおたがいのカメラの水平距離、左右の目標物の画像の位置の違いを組み合わせ、目標物までの距離を推定します(図7)。

図4 レーザスキャナの長所・短所

レーザスキャナ

トラクターから中距離の障害物を検出するのに適している



図5 カメラ

設置例:

トラクター上部にカメラを設置



USB接続



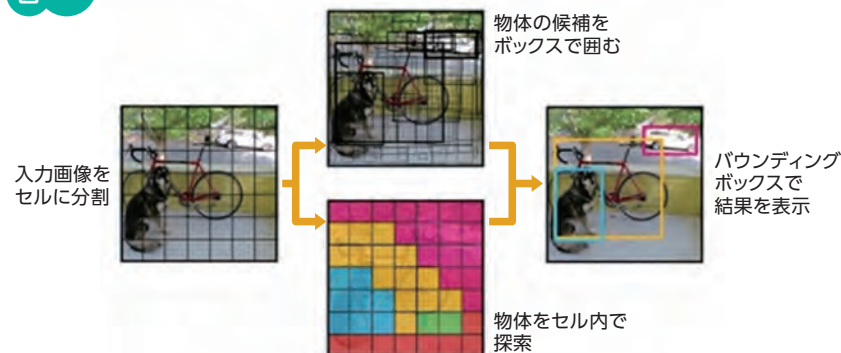
AIによる人間検出

人間検出信号を送る



画像処理PC

図6 AIが物体を識別



<https://medium.com/analytics-vidhya/yolo-explained-sb64456431>

画像をいくつかのセルで区分して、物体の候補をボックスで囲んで探索。そして候補をバウンディングボックスで囲んで結果を出し、そこに犬や自転車、離れたところに自動車が見えていることを認識する。

カメラの長所・短所

カメラは中・遠距離の障害物を検出するのに適しています。車両ロボットの上部に取り付けられますが、運転席にも設置することは可能です。

カメラの長所は「高い防水性・防塵性」「他のセンサにくらべて低コスト」「設置が容易」「周辺環境の広い視野が得られる」などです。短所は「機械的振動や照明条件に大きな影響を受ける」「精度がレーザよりも劣る」「ステレオビジョンカメラは高価」「AIを使用するためハイスpek的なコンピュータが必要」などです。



近接センサ

人ないしは障害物が近づいてくる、または接触したことを検知します。「超音波センサ」や「接触センサ」などがあります。

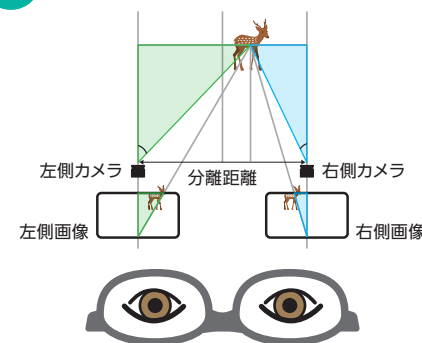
超音波センサは、人間の耳には聞こえない周波数の超音波を発信させ、跳ね返ってきたエコーを受信します(図8)。基本的にはレーザスキャナと同じ原理ですが、速度は音速(300m/秒)を使います。目標物が小さいと超音波の反射が検出できない場合もあるので、距離測定のコセンサとしてではなく、近接センサとして使用されます。

一方、接触センサは頑丈なスイッチでできていて、物理的に接触すると回路が開いて電流の遮断を検出し、接触を検知します。ただし稼動する機械部品が多いため経年劣化しやすいので、可動式ではない「誘導型近接センサ」も開発されています。これは接近する金属物体を磁場を使うことで検知するもので、泥などで汚れていても作動します。

近接センサの長所・短所

近接センサは車両ロボットの全周や一部の作業機に取り付けられます。長所は「頑丈でメンテナンスが少なくすむ」「他のセンサにくらべて低コスト」「まわりに多くのセンサを取り付け可能」などです。短所としては、「超音波センサは雨や埃の影響を受け、距離測定の精度が悪い」「設置が難しく、特別な取り付け部品が必要」などです(図9)。

図7 ステレオビジョンカメラ



ソニー製の高感度センサを用いたステレオビジョンカメラ
(ZMP社RoboVision 2s)

ステレオビジョンのイメージ。左右のカメラの水平方向の分離距離や、左右の画像位置の違い、三角形を用いて、距離を計算する。レーザがなかったころの船舶では、同じ原理を用いた測距儀で距離を測っていた。

図8 近接センサ



誘導型近接センサの一例。誘導型近接センサは、泥や液体など汚れの可能性があるところでも使用可能。

図9 安全センサの長所・短所



安全センサは、それぞれに長所と短所があるので、数種類のセンサを組み合わせ使用するようにする。

農業は膨大なデータを活用して行われる

農業を行う上では、さまざまなデータが必要になります。たとえば図1は水稲耕作の一連の作業をあらわしていますが、土壌の状態、気温・湿度、水田の水位や水温はもちろん、農作業機の作業履歴や作物の生育状況など、必要とされるデータは多岐にわたります。また、従業員や家族の労働時間、肥料代、種子代、燃料代などがそれぞれの工程でどれくらいかかっているかに関するデータも経営管理情報として活用されます。

これらのデータにもとづいて最終的な決断を下すのは農家の人です。曇りが続いているという「データ」と、生育が進んでいないという「データ」、そして去年の生育「データ」などを突き合わせることで、「このあとも作物の生育は〇〇日ほど遅れそうだ」という、意味のある「情報」を得ることができます。また、このあとの作業をどうするか、「判断」が下せるのです。

今までのスマート農業では、多種多様なデータを「自分で独自に取得する」か、または「自分でデータを整理して利用する」という方法がとられてきました。しかしそこでは、過去のデータやその他の必要なデータを、いちいち専用のソフトを使うなどして、自分の頭の中でデータを整理したりしなければならませんでした。

そうした、わずらわしさをなくし、農業における情報活用の合理化をもたらすのが「クラウド型データベース」なのです。

「クラウド」とは何か？

そもそも「クラウド」とは、インターネットなどのネットワークを使って、ユーザー(利用者)にさまざまなサービスを提供する形態をいいます(図2)。このクラウドは、以下の3つの要素から成り立っています。

- **SaaS** (ソフトウェア・アズ・ア・サービス)：ソフトウェア(利用するアプリケーション)の利用をインターネット上で提供すること。
- **PaaS** (プラットフォーム・アズ・ア・サービス)：アプリケーションを動かすための土台になる部分をインターネット上で提供すること。
- **IaaS** (インフラストラクチャ・アズ・ア・サービス)：アプリケーション

図1 従来は、それぞれのデータを自分で見に行く、もしくは自分でデータを整理しなくてはならない

農業で利用する情報例



図は水田の作業をあらわす。一連の作業を行う上で、さまざまな情報が必要になる。

図2 クラウド



今までのパソコンと、インターネットサービスであるクラウドの違い。

ョンやデータの保存サービスをインターネット上で提供すること。

今までは、パソコン本体のHD（ハードディスク）にアプリケーションや基本ソフトをインストールしていました。クラウドでは、それをインターネット上にあるSaaSとPaaSが提供してくれるので、インターネットに接続するだけで目的のアプリケーションを利用することができます。

また、いままではパソコンのHDをストレージとして、そこにソフトウェアやデータを保存して利用していました。もちろん、別にアプリケーションやデータが必要になったときは、新たにそれらを入手してHDにインストールしなければなりませんし、HDの容量が足りなくなれば、追加のHDを用意しなければなりません。これに対してクラウドではIaaSがストレージ機能を用意するので、手元の記憶装置が不要となります。いわば、パソコン（のHD）という「限られた空間」ではなく、インターネットという、さまざまなものとアクセスできる「広大な空間」を利用しているわけです。

クラウドによるサービスの実例

クラウドを用いた気象情報

実際のクラウドサービスを見てみましょう。北海道岩見沢市が運営している「岩見沢市農業気象情報サービス」では、市内13か所に気象観測ロボットを設置し、インターネットを通じてクラウド上に気象観測データを集めています（図3）。画面にある13か所のアイコンをクリックすれば、パソコンやスマートフォン、タブレットなどを使って各箇所の観測情報や天気予報を確認することができます。

このサービスのプログラム（アプリケーションとデータ）はクラウド上に置かれています。観測データは、「平均標高」や「起伏量」などの地形データと照らしあわされて、50mメッシュ（50m四方のマス目）ごとに気象情報を細分化します（図4）。つまりここでは観測点を中心に得られたデータから、周辺の微細な変化を50m単位で再現できるようにしています。

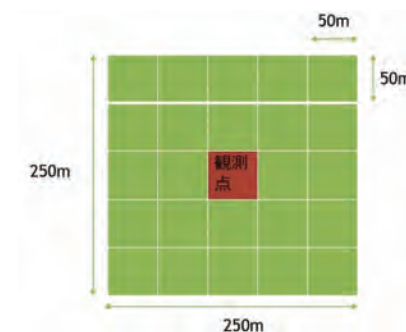
※「IaaS」は、「イアーズ」とも呼ばれることがあります。

図3 クラウドサービスの一例



気象データを得るために、直接現場にデータを見に行く必要がなく、さらに自動的に加工された情報を見することもできる。また、パソコンはもとより、スマートフォンやタブレットでも確認が可能のため、どこでもいつでも確認できる（「岩見沢市農業気象情報サービス」より）。

図4 観測点の情報は50mメッシュサイズに自動的に加工される



No.	地形因子	内 容
1	平均標高	250m内に存在する50mメッシュ標高データ25個の平均値
2	最高標高	上記25個標高データの中の最高値
3	最低標高	上記25個標高データの中の最低値
4	起伏量	最高標高値-最低標高値
5	最大傾斜度	上記25個の標高計測点の中で隣り合う点との傾斜の最大値
6	最大傾斜の方位	上記最大傾斜の方位（時計まわり NE→Nが1→8に対応）
7	開放度	1辺が250mメッシュ3個からなる正方形内の9個のメッシュ中で、中心メッシュの平均標高より10m低いメッシュの割合

1つ1つのメッシュ（マス目）に観測されている気温・湿度・風向・風速などのデータがあり、クラウド上で作物ごとの予想情報にも加工されている。

データを解析して加工する

メニューの1つである「天気予報」は、1時間ごと、1日ごと、1週間ごとの予報を見ることができ、さらにウェブカメラで現地のようなすを確認できます。

それだけではなく、単純に気象データを見るだけでは判断がつかない要素を加工して提供しています。たとえば、「葉いもち病発生予測」のメニューは、収集された日照時間、表面温度、露点温度などのデータをもとに、やはり50mメッシュサイズで病気の発生を予測し、その情報を配信しています。

また、農家にとって収穫日の決定は、トラックの配置やコンバインの準備・稼動時間などにも影響するので重要です。そこで、降水量や気温、湿度、日射量から収穫を予想する「収穫予測」のメニューが用意されています。これも50mメッシュごとに色分けして地図上で可視化されるので、使いやすくなっています(図5)。

その他にもさまざまなデータが加工され、クラウド上でユーザーに配信されています。こうしたサービスは岩見沢市の例にかぎらず、さまざまな地域でいろいろなデータが用意され、ユーザーが判断する際に利用しやすい形で配信されています。

クラウドで入力作業を行い、作業成果の精度を上げる

こんどは「IaaS」を取り上げます。

農家が栽培する作物に関して生育ステージを見ると、予測情報と合わないことが起こります。そうならないために、「自分がいつ作業したのか」「自分の農地ではいつ、どういう生育ステージになったのか」に関する情報を記録できるフォームをクラウド上に用意しているメーカーが多く存在します。つまり、農家は随時、そうしたデータをクラウド上で入力して記録することで予測の精度を上げることが可能となっています(図6)。

今まで述べてきたような、情報を集約するクラウドのサービスは、もちろん岩見沢市だけではなく、多くの自治体や、農機メーカーなどからも提供されています。

図5 収穫時期の目安、収穫する圃場の順番検討の資料として活用可能



さまざまな気象情報をもとに加工し、収穫予想を提示する。地図上で色分けされていて、把握しやすい(「岩見沢市農業気象情報サービス」より)。

図6 作業成果の精度を上げる

地点を登録し、空欄に育成ステージの情報を記録する。こうすることでメッシュごとの予測の精度が上がり、予想と結果のズレをなくしていく(「岩見沢市農業気象情報サービス」より)。

労力の削減——ドローンによる写真情報処理の例

近年、ドローンが撮影した圃場の写真情報を活用して作物の生育状況の確認が行われるようになってきました。しかしそこでは、数ha撮影するだけで写真は数百枚にもなります。それをパソコンに取り込み、専用ソフトを使って1つに統合し、さらに生育状況がわかるよう「植生活性化指数 (NDVI)」に変換するといった加工をしなければなりません。こうした作業を農家が行うのは、大変な労力と時間を消費することになります。

ところが、クラウドの特定のサービスを利用することで、こうした作業の省力化を図ることができます。

まず、ドローンが撮影したデータをクラウド上にアップロードすると、たくさんある写真が自動的に1つに統合されます。その際、地面の高低などのデータも自動的に算出され、写真に反映されます。同時に、NDVIに変換された画像も自動的に作成されます(図7)。

このように、クラウドでは個別の情報を自動的に統合させることも可能となり、農家の省力化にも貢献します。

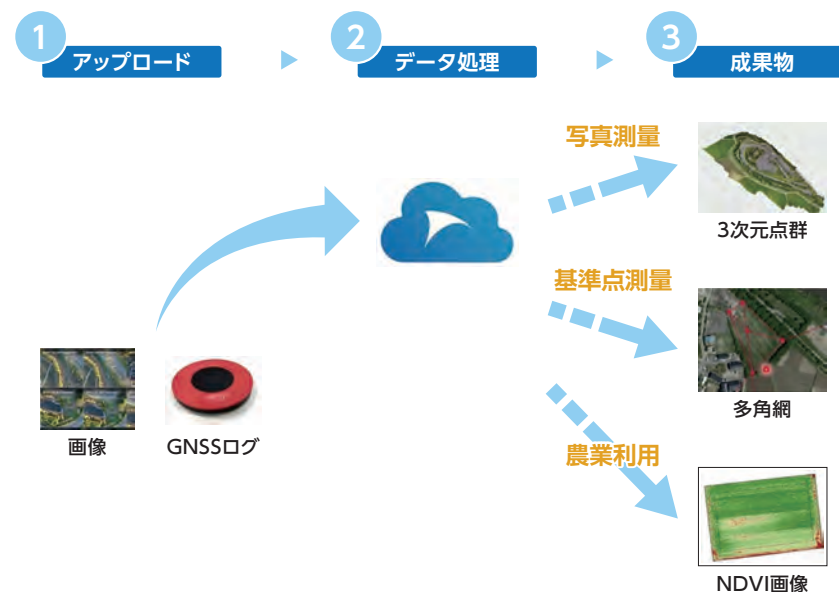
クラウド型データベースの今後

このように、クラウドの利用は農業の省力化・合理化に大いに貢献する利点を持っています(図8)。

ただし、問題もあります。現在、主要農機メーカーなどがクラウド上にデータを集約させるサービスを行っており、それぞれの農機の情報やデータとサービスを連携させています。しかし、別の農機メーカーのデータと連携させることはできません。そこで、こうしたメーカーの壁を越えて複数社のデータをクラウド上で連携させることによって1つの画面で見ることができる「アグリノート」というサービスも開始されています。つまり、「個別の情報を統合させる」ということです(基礎編・第9節)。

今後クラウドでは、さまざまなシステムの壁を越えて、1つのシステムや1つのタブレットで情報を見ることができるような方向に進歩していくことになるでしょう。

図7 アロセンス(株)のサービス「AEROBO Cloud」の例



アップロードした画像は、自動的にクラウド上のサービスによってデータ処理され、さまざまな加工が施される。

図8 クラウドの利点

- パソコンの技能がなくてもさまざまなデータを簡単に見ることができる。
- いつでも、スマートフォンやタブレットなどでデータを見ること、利用することができる。
- 初期投資が不要となるため、安価にサービスを受けることが可能となる。
- 大量のデータをいつでも、どこでも利用できる。

通信技術が支えるスマート農業

スマート農業は、「情報にもとづく農業」といえます。農家は気象や生育状況、水田の水温や水位、土壌温度、さらに農機や人員の作業履歴などのさまざまな情報にもとづいて、農作業ひいては営農を進めていきます。そのため、データや情報をもたらす「通信技術」が必須となります。

通信技術の中でも「無線通信」は、広大な圃場で用いる上で最適なものとなります。将来、野外のロボットトラクターを自動走行させるためには、位置情報がリアルタイムで常に得られなければなりませんし、少し離れたところにあるセンターに監視映像が送られなければなりません。

無線通信には図1のようにいろいろなものがありますが、スマート農業では、「5G」が注目されています。

5G 通信に見るスマート農業の通信技術

2019年6月、北海道大学、北海道岩見沢市、そして民間企業であるNTT・NTT東日本・NTTドコモが、「産官学連携協定」※を締結しました。これは、スマート農業などの達成のために最先端の情報通信やロボット技術の活用を産官学が連携して行うための協定といえます。通信技術に注目すると、民間企業からはNTT系列が参加しており、将来のスマート農業における通信技術開発が進められています。

スマート農業の通信技術として重視されている「5G」は、近年マスコミでも取り上げられているため、ご存じの方もいると思います。携帯電話などのモバイルネットワークは、アナログ方式だった第1世代から始まり、現在は最新の5G、つまり「第5世代(5th Generation)」の時代となっています(図2)。この最新の通信技術をスマート農業に活用することが推進されているのです。以下、NTTドコモの5Gに焦点を当てて、スマート農業における通信技術を見ていきましょう。

5Gの特徴は「高速・大容量」「低遅延」「多数端末接続」の3点です。そもそも通信に求められる条件とは、多くの情報を、時間をかけずになるべく早く多くの対象者に伝えることです。たとえば車両ロボットでは、自動

※産官学連携協定：正式には、「最先端の農業ロボット技術と情報通信技術の活用による世界トップレベルのスマート農業およびサステナブルなスマートアグリシティの実現に向けた産官学連携協定」という。

図1 さまざまな無線通信方式

無線通信方式の例 IoTで使う無線機器は、距離・速度・消費電力などの条件を考慮して選ぶとよい

特徴	規格	利用周波数	通信速度	通信距離
長距離、高速通信	3G、LTE など	700MHz帯 ～2.5GHz帯	高速(～数Mbps程度)	～10km程度
近距離、高速通信	Wi-Fi	2.4GHz、5GHz	高速(～1Gbps程度)	～十m程度
	Bluetooth	2.4GHz	高速(～数十Mbps程度)	～十数km程度
近距離、低消費電力	ZigBee	2.4GHz	低速(～数百kbps程度)	～数十m程度
	Wi-SUN	920MHz	低速(～数百kbps程度)	～数百m程度
長距離、低消費電力	SIGFOX、LoRa、eMTC、NB-IoT (LPWA)	700MHz帯 ～2.5GHz帯	低速(～1Mbps程度)	～数十km程度

※総務省IoT機器等の電波利用システムの適正利用のためのICT人材育成事業「講習テキスト」より抜粋

Wi-FiやBluetooth、LPWAなど、無線通信にはさまざまなものがあるが、距離や速度、電力消費などの要因で性質が異なる。

スマート農業での無線通信活用事例

トラクターの自動走行



5G/4G/3G、BWA等利用
自動操舵時の制御信号や、
監視映像の伝送など

水田水の管理



4G/3G、LPWA等利用
計測した土壌データのクラウドサーバーへの送信など

車両ロボットや水田の水管理など、目的に応じた無線通信技術が使用される。

図2 モバイルネットワークは約10年単位で世代交代が行われている



5Gは、4Gの次の世代の通信技術と位置付けられる(図：NTTモバイルの資料より。以下同)。

運転の制御信号の送信が少しでも遅れば、車両ロボットは経路から外れてしまうでしょう。5Gは、多くの情報を高速で送ることができ(高速・大容量)、その伝達にも遅れが少なく(低遅延)、さらに多くの端末に接続することが期待できる(多数端末接続)技術なのです(図3)。

以前の4Gと比較すると、5Gが目標としている将来的なスペック(性能)は、以下ようになります。

- 高速・大容量：最大通信速度 1.7Gbps^{*} (4G) → 20Gbps (5G)
- 低遅延：無線区間の伝送遅延 10ms^{*} (4G) → 1ms (5G)
- 多数端末接続：同時接続数 10⁵ デバイス/km² (4G) → 10⁶ デバイス/km² (5G)

5Gの特徴——高速・大容量

さまざまな通信で使われる電波はそれぞれ異なった周波数が使用されますが、NTTドコモの「瞬速5G」では、高速・大容量を達成させるために、高い周波数である3.7GHz、4.5GHz、28GHzの3つの周波数帯を使用しています。このうちの3.7GHzは新しく採用された周波数です。4G以前に用いられていた周波数よりも高いため、帯域幅が広く、豊富な周波数の領域を使用できるので、高速・大容量が可能となっています(図4)。

電波は、一般に「周波数が高ければ高いほど直進性が強くなる」ので、遠くまで届きません。このため5Gでは、通信エリアが比較的狭くなるという特徴があり、基地局をたくさん設置する必要があります。

また、4Gは屋内でも安定して使えることが多かったのですが、5Gの電波は壁を通り抜けにくいという特徴もあります。逆にいえば、圃場間など野外での高速・大容量通信に5Gは適しているともいえます。

実効速度と基本スペックは異なる

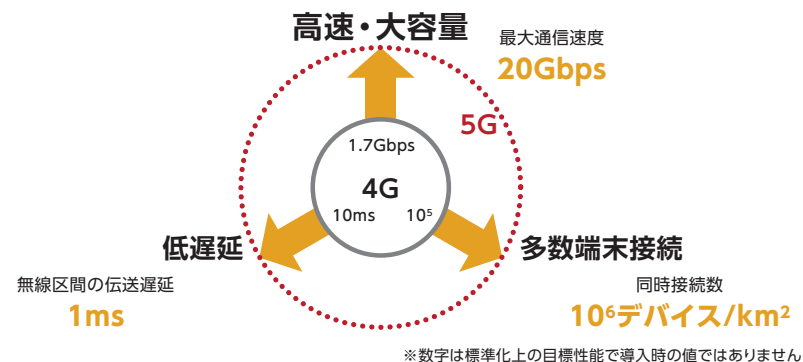
現在のドコモの5Gは、「受信速度4.2Gbps」「送信速度480Mbps」です。ただし、みなさんもスマートフォンを使って感じるかもしれませんが、通信速度において、公表されているスペック値と、実際に使用し

^{*}Gbps:「ギガ・ビー・ピー・エス」と読む。bpsは伝送の速度をあらわす単位。1Gbpsは1秒間に10億ビット(1ギガビット)の容量のデータを送れることをあらわす。Gbpsの下位として、Mbps(メガbps。Mは100万)がある。

^{*}ms:「ミリ秒」の意。1msは1000分の1秒をあらわす。

図3 5Gの最大特徴と将来の目標スペック

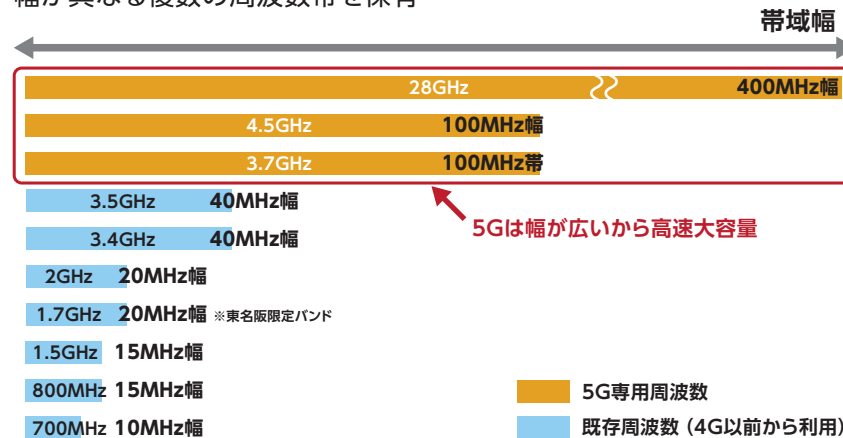
高速・大容量/低遅延/多数端末接続



図はあくまでも将来の目標値。5Gの多数端末接続の「10⁶デバイス/km²」とは、1km²あたりの同時接続が100万デバイス可能ということ(デバイス: パソコンやスマホなどの装置のこと)。

図4 ドコモが使用している周波数帯

幅が異なる複数の周波数帯を保有



横幅は各周波数の幅の広さ(帯域幅)をあらわす。水色の4G以前の周波数は10～40MHz幅の領域だったが、ドコモの5Gは100～400MHzという幅が広い領域の周波数が使用されているため、高速・大容量が可能となっている。

たときの実効値には差があります。おおむね、通信速度の実効値の最大は、スペック値の約50%程度といわれています。

このような現象になる要因としては、「無線品質」「混雑度」そして「通信速度のばらつき」があります。基地局から離れていたり受信側が移動していたりして無線品質が悪かったり、1つの周波数を複数の人が分けて使うなど混雑していたりすると、スペック通りの性能とはなりません。また測定した場所やタイミングなどの環境によって通信速度にばらつきが生じることも影響します。

スマート農業での通信技術開発に参画しているNTTドコモのホームページでは、現在「受信時最大4.9Gbps」「送信時最大1.1Gbps」の場合、実効速度は「受信時441Mbps～833Mbps」、「送信時187Mbps～385Mbps」となっています。

スマート農業における5G通信の高速・大容量について考えるときには、スペックの速度と実効速度の違いにも注目することが必要です。

高速化の技術①——キャリアアグリゲーション(CA)

前述したように5Gは高速化のために周波数の幅に工夫をしていますが、その他にも「キャリアアグリゲーション」「MIMO」「QAM」の3つの技術によって高速化しています。それぞれを道路にたとえて説明しましょう。

まず「キャリアアグリゲーション」は、いくつかの周波数を束ねて高速化するもので、ちょうど「道路の幅を拡大する」のにあたります。3つの周波数を束ねる場合を「3CA」、4つでは「4CA」などといい、多くの周波数を束ねるほど通信速度が向上します(図5)。

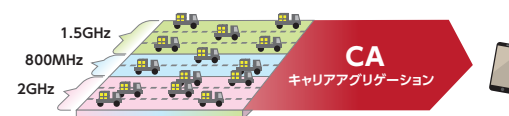
高速化の技術②——MIMO

「MIMO」は複数のアンテナ間でデータを送受信して高速化を図る方法で、道路の例でいえば、「ルート数を拡大する」ことに相当します。

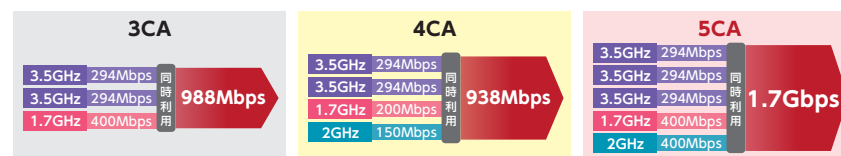
通常、基地局と端末の間では1つずつのアンテナによる1つのルート、つまり1つの道路しかありません。しかし基地局側と端末側にそれぞれ2つのアンテナを置く「2×2MIMO」にすれば2ルートできるので、これによって2倍の通信速度が達成できることになります(図6)。

図5 キャリアアグリゲーション

周波数を束ねて幅の広い道路をつくり高速化



たとえば、1.5GHzと800MHz、2GHzの3つの周波数がある場合、それぞれに通信データを通すことで、速度を上げる。

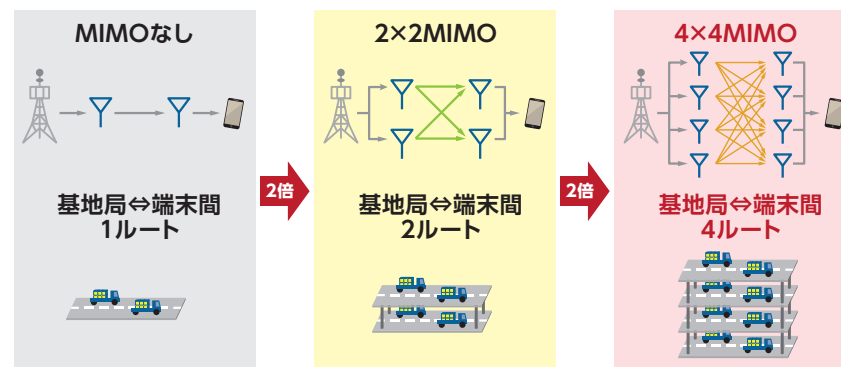


3CAでは988Mbpsだったが、4CAでは938Mbps、5CAに増やすと1.7Gbpsにまで速度が上がるのが期待できる。



図6 MIMO

複数のアンテナ間でデータを送受信通信する



基地局－端末間でアンテナを2つずつ増やすのは「2×2MIMO」、4つずつ増やす場合は「4×4MIMO」という。

高速化の技術③——QAM

QAMは、電波の振幅(振れ幅)と位相(波のタイミング)を細分化する方式です(図7)。「荷物を運ぶトラックの積載量を増加させる」ような方法です。

振幅4パターン・位相4パターンに細分化すれば $4 \times 4 = 16$ で、これを「16QAM」といいます。現在は振幅16パターン・位相16パターンにまで細分化できるので、「256QAM」が可能となっています。

5Gの特徴——低遅延と多数端末接続

高速・大容量はすでに実現した技術ですが、低遅延と多数端末接続は、これから実現が期待されている分野です。

まず「遅延」とは、「データを要求してから最初に到達するまでの時間」のことです。たとえば、スマートフォンでURLをクリックしてから表示されるまでの時間が「遅延」です。遅延は経路にある伝送装置やネットワーク装置など、各部での小さな遅延が積もっていき生じます。

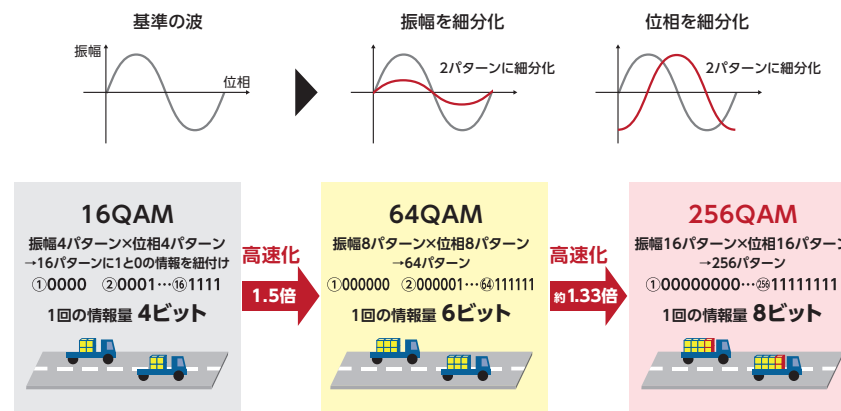
この対策としては「MEC」があります。遅延は無線区間ではごくわずかで、有線区間での遅延が影響を与えます。MECは、サーバを少しでもスマートフォンなどの端末の近くに置くことによって低遅延を実現しようという方法です(図8)。

一方「多数端末接続」のほうは、5Gにおいては現時点では独自の技術がまだ動いておらず、このためLTE-Mなどの4Gの既存の技術が引き続き活用されています。

図7 QAM

電波の振幅と位相を細分化して1回に運ぶ情報量を増やす

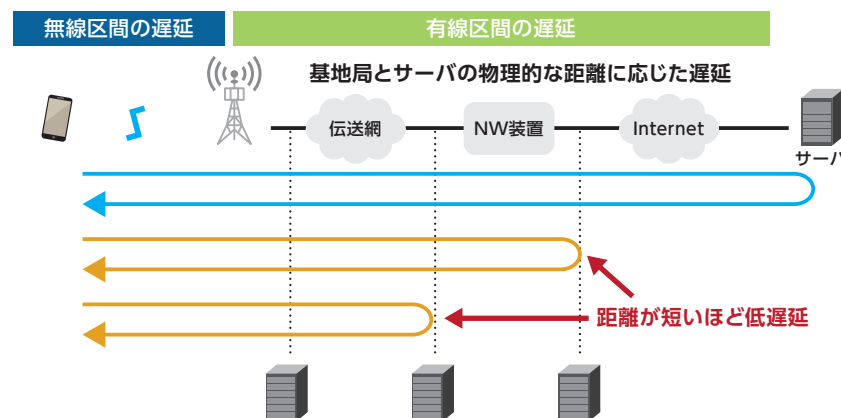
細分化イメージ



上のグラフで振幅と位相の意味、そして細分化のイメージを把握してほしい。ある周波数の電波の波を細分化することで、そこに載せる情報量を増やす方法である。

図8 低遅延を実現する技術：MEC

通信先であるサーバを近くに置くことで低遅延を実現





「人間の目」から「機械の目」へ

長い歴史の中で、農業は人間が主体となって行われてきました。しかし近年では農業の担い手が不足しており、また一方で農業自体も大規模化する傾向にあって、効率化や省力化が求められるようになってきています。

このため車両ロボットなどの機械が農作業に使用されるようになりましたが、そうすると、ロボットが作物と雑草を見分けたり、生育状況を判断できなければなりません。判断できなければ、作物を雑草と認識して刈り取ってしまうでしょう。つまり「人間の目」で判断していたことを「機械の目（マシンビジョン）」で見て、正しく判断しなければならないのです。



色と画像判断の関係

RGB 色空間

人間もコンピュータも、基本的には「画像（映像）」でものを検知してそれが何かを判断します。まず、「デジタル画像」について見てみましょう。

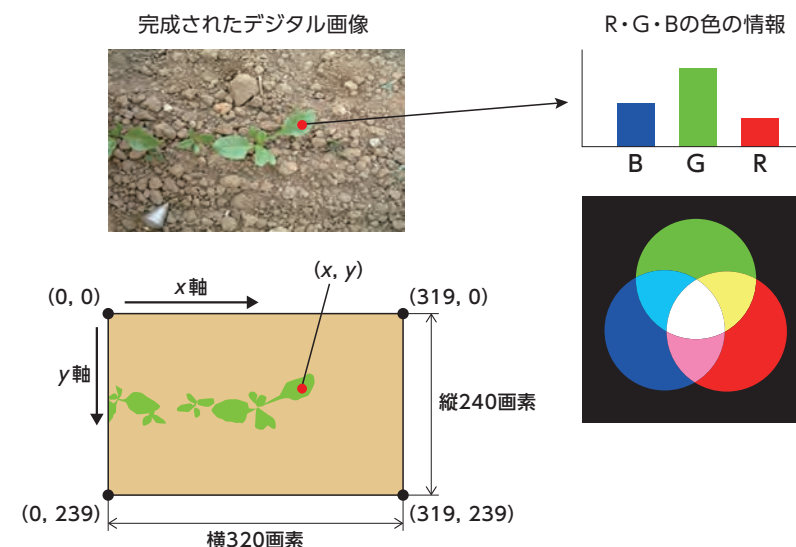
デジタルカメラやスマートフォンのカメラのように私たちがふだん目にしているカメラは、「RGBカメラ」といいます。RGBカメラによって撮影されたデジタル画像は、小さな点がたくさん集まって構成されており、この小さな点のことを「画素（ピクセル）」といいます。そして、この1つの画素の中には、データとして「R（レッド：赤）」「G（グリーン：緑）」「B（ブルー：青）」の3つの色のデータが数字として入っています（図1）。

RGBカメラは学校でも習ったことがある「光の三原色」によって、さまざまな色を生みだしているわけです。このような、赤・緑・青にもとづいてあらゆる色をあらわすものを「RGB色空間」といいます。

それなら、緑色は植物、茶色は地面と、機械にも簡単に判別ができるように思われます。たしかに私たち人間は、地面に生えている植物の写真を見たとき、瞬時に脳が判断して直感的に理解することができますが、「機械の目」は数字データで判断するので簡単ではありません。

さまざまな色は、光の三原色の組み合わせでつくられていますが、「緑

図1 RGB色空間



撮影されたデジタル画像は、たくさんの画素によって構成されている。図は、縦240画素・横320画素を例としている。画面は横がx軸、縦はy軸であらわされ、左上が原点(0,0)で、画面内のある任意の位置の画素は(x, y)であらわされる。1つの画素にはR(赤)、G(緑)、B(青)の3つの色成分(情報)があり、この光の三原色の組み合わせ、つまりそれぞれの色成分のレベルを組み合わせることによって、さまざまな色を表現している。3色が合わさる(R・G・Bが最大)と白で、いずれもない(R・G・Bが0)ところは黒となる。

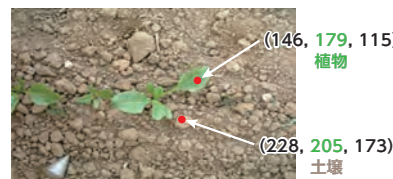
っぱいもの」にも赤や青の成分の情報が含まれており、その相対的なバランスによって色が生み出されています。単純に「緑成分が強い部分を植物と判断する」としてしまうと、もし、土壌の部分の画素の緑成分が他のところより強ければ、コンピュータは土壌の部分を植物と判断する可能性が高くなります(図2)。基本的に、私たち人間の目と同じしくみを使っているのですが、私たちが直感的に判断するのと違い、コンピュータは詳細で膨大な数字情報をもとに画像を判断するわけです。

HSV 色空間

RGB色空間以外にも、色の違いのあらわし方がいくつかあります。その1つが「HSV色空間」で、これは「色相(Hue)」「彩度(Saturation)」「明度(Value)」の値の組み合わせでさまざまな色を表現します(図3)。このうち「色相」とは、色の違いをあらわしています。また「彩度」は鮮やかさをあらわし、低くなるとくすんでいって、最後はどの色も灰色になります。そして「明度」はその名のとおりに明るさをあらわしていて、暗くなっていけば最後には真っ暗、つまり黒になります。

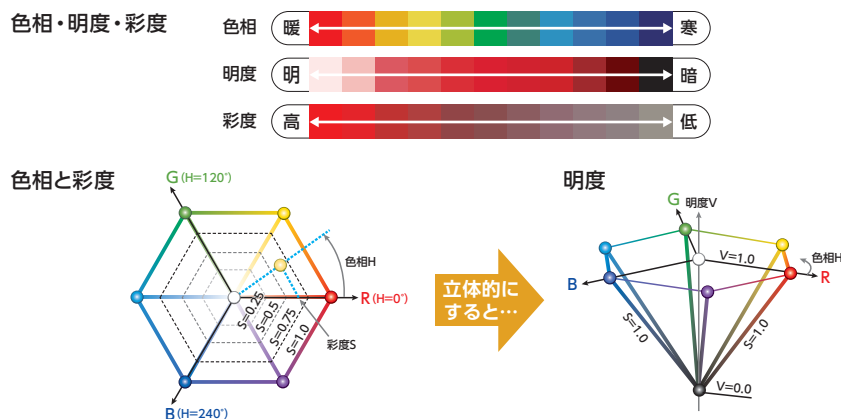
HSV色空間では、たとえば「土と葉っぱを見分けたい」という場合は、色相に注目して「色相の数値が120前後なら緑だ」ということから土と判別できます(図3)。RGB色空間が、色を三原色に分解する人間の目の機能に近いものであるのに対して、HSV色空間は人間が脳の中で色を認識する考え方に近いといえます。

図2 コンピュータによる判断



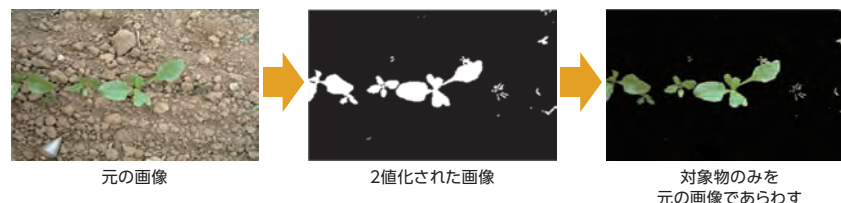
植物の部分は(146, 179, 115)で、G(緑)が「179」と強い。茶色の土壌部分は(228, 205, 173)でGがほかよりも弱い。しかし、もし「G成分が高い部分を植物とする」としてしまうと、コンピュータは「205」のほう、つまり土壌を植物と判断することになる。

図3 HSV 色空間



「色相・彩度・明度」の図はR(赤)を例としているが、他のさまざまな色にも当てはまる。下の2つの図は、色相・彩度・明度をわかりやすく模式図化したもの。色相Rは六角形の0°の位置、G(緑)は120°、B(青)は240°の位置にあり、黄色は60°、水色は180°、紫は300°と移動すると色相が徐々に変わっていく。彩度は、中心(灰色)と外の辺の間の距離となる。これに対し、明度は右の図のように高さのようなもので、下の中心部に行くにつれて暗くなり、いちばん低い位置では黒になる。

図4 2値化



画像処理の基本 —— 2値化とラベリング

「画像に写っている作物の葉を分析したい」とき、背景の地面の画像データは必要ありません。その場合、興味のあるところだけを残して、それ以外を取り除く方法を「2値化」といいます。

図4は2値化された画像で、不要な地面は黒く、分析したい葉の部分は白くなっています。色付きで見たい場合は、白部分を元の画像データに戻せます。2値化は、処理をするときに楽になる他、余分な画像データを取り除くのでデータ量を減らせるというメリットがあります。

2値化によって対象物をしぼっただけでは、まだ終わりではありません。図5を見てください。左側の四角のなかに4つのかたまりがあることが人間にはわかりますが、コンピュータにとっては「それぞれのピクセル(画素)が白か黒か」という情報でしかありません。そこで右側のように、それぞれのかたまりごとに番号をつけることで、「4つのかたまりがある」とコンピュータは認識できるようになります。これを「ラベリング」といい、こうして果実の熟し具合や、虫食いの状況などを個別に判断することができるようになります。



画像処理の基本——形状特徴量

コンピュータなどに機械の目で判断させるには、収穫物などの「形状」も数字であらわさなければいけません。図6のように、丸っこいものとギザギザのものを人間は一目で違うと認識しますが、コンピュータで処理する場合は、「丸っこい」「ギザギザ」のようなあいまいな表現が通用しません。その場合は対象物の「形状特徴量」を見ます。

たとえば、面積はほぼ同じでも、その周囲の長さはギザギザのほうが長いので、「周囲長÷面積」で数値の違いを出して判断させます。このほか、長いほうの径と短いほうの径の比である「長径÷短径」や、対象物の重心が真ん中か、外側に寄っているかを見る「2次モーメント」などがあります。

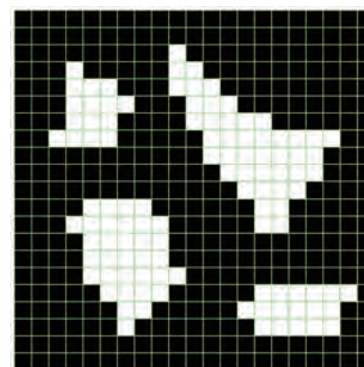


画像処理の基本——テクスチャー

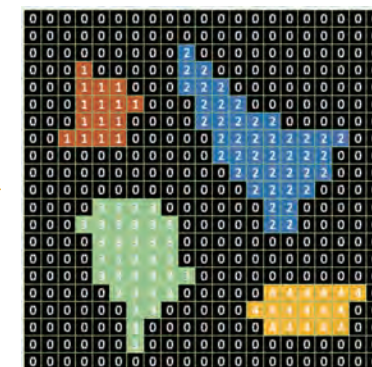
1枚の葉の画像をアップにすると、緑色がのっぺりとフラットに映ります。しかし、牧草地の一部をアップにすると、たくさんの細い植物が折り重なり、すき間は下の地面の暗い部分がところどころ写っていてゴチャゴチャした画像になります。このような、画像の模様を認識する方法が「テクスチャー」です。

テクスチャーを数字で表す方法はいくつかありますが、先の牧草地の例の場合は「明るさのばらつき」を利用します。1枚の葉の明るさはのっぺりとしていて一定ですが、牧草地の画像は一定ではないので、その違いを数

図5 ラベリング

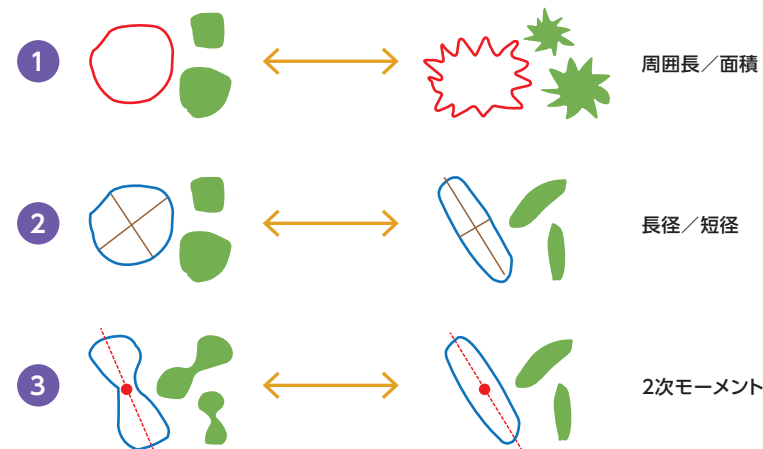


①2値化により、対象物のかたまりがしぼられる



②ラベリングをすることで、それぞれのかたまりが意味のあるものとなる

図6 形状特徴量



- ①丸っこい形状とギザギザの形状の面積はほぼ同じだが、周囲の長さはギザギザのほうが長いので、周囲長を面積で割れば違いが数値として出てくる。
- ②丸っこいほうは長径も短径も同じなので、細長い方との違いがわかる。
- ③赤い点はこの形状の重心。ひょうたん型は細長いものにくらべて重心が外側寄りとなっている。

字データとして出します。

今まで説明してきた画像の判断はコンピュータが最終的に行いますが、その際にはAI（人工知能）を用いることができます。AIについては第8節でご説明します。

その他の画像——3次元画像とマルチスペクトル画像

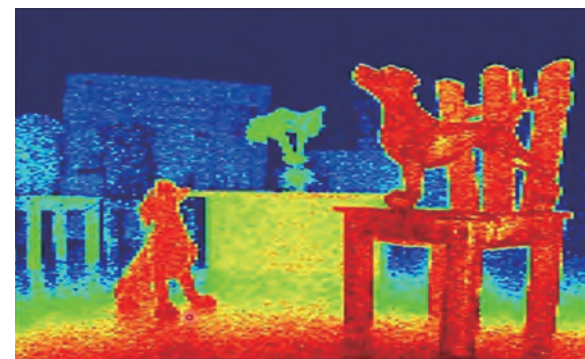
一口に画像といっても、私たちが普段使うデジタルカメラの画像以外にも、さまざまな種類の画像があります。その1つが「3次元画像」です。3次元画像は奥行きを持っています。写真1は奥行きを色で強調した画像の例で、手前にあるものを暖色（赤系）、奥にあるものを寒色（青系）で表現しています。

3次元のカラー画像は、色に関する情報（R・G・B）に距離Dを加えた4つの画素データから成り立っています。距離を測る方法にはいくつかありますが、よく使われるのは、第4節でもご説明した「ステレオビジョン」です。目の前に指を置いて左の目で見、次に右の目で見ると、指の位置がズレて見えます。指が目から近いほどズレが大きく、遠ければ遠いほどズレは小さくなります。ステレオビジョンカメラは、こうした人間の目による距離測定を2つのカメラを使って行います。

またスマート農業では、R・G・Bだけでなく近赤外線などのデータを加えた「マルチスペクトル画像」も利用されています。植物は近赤外線などによく反応するので、このマルチスペクトル画像によってクロロフィル（葉緑素）の量がわかり、それを作物の生育状況を算出する「正規化植生指数（NDVI）」で計算すれば、生育状況をあらわす植生マップ、つまり新しい情報に加工することが可能となります。

3次元画像を撮影できる装置をはじめとする映像機器はかつては数百万円もしたものもあり、たいへん高価でしたが、現在では数万円で購入できる3次元カメラも出てきており、農業分野で活用しやすくなりました。そして、こうした高度な情報を持った画像を処理する技術は第8節で取り上げるAI（人工知能）の発達によって大幅に向上することが期待されています（図7）。

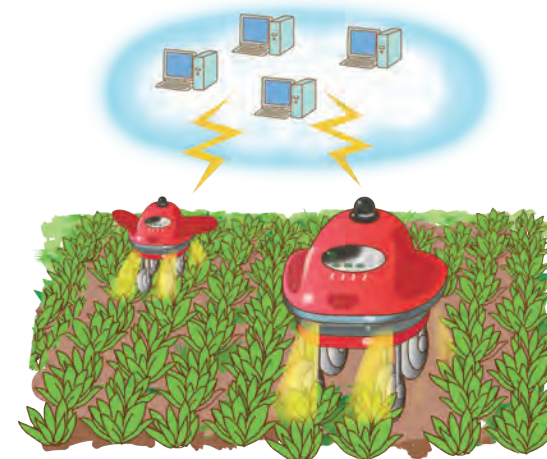
写真1 3次元画像



距離画像 + カラー画像 = 3次元カラー画像

上の写真は3次元カラー画像の一例で、奥行きを寒色系で強調してあらわしたものです。3次元画像を得るには距離を測らなければならないので、撮影には「ステレオビジョン」や「TOF (Time-of-flight)」 「パターン照射方式」などのカメラが必要になる。

図7 画像処理技術とAIが農業の姿を変えていく



人間が目で見えて判断していたことを、これからは機械が見て判断し、より高度な情報を提供してくれるようになるだろう。



「AI」とは何か？

「AI (人工知能)」にはさまざまな定義がありますが、あえていえば、「人間(もしくは人間以上)の知的な活動を、コンピュータ上で人工的に再現したもの」と定義できます。

AIは現在世界中で開発が進められている最先端の研究分野で、たとえば自動車をAIに運転させる「自動運転」は実際の道路での試験などもさかんに進められています。

このようにAIは研究途上ではあるものの、すでにいろいろな分野への導入が進められています。たとえばオンライン会議での発言(音声)を自動的に文字におこしたり、スマートフォンなどで音声で投げかけられた質問に答えたりする「音声認識」です。Googleの翻訳機能などでもおなじみの「自動翻訳」は、「音声認識」と組み合わせて、日本語の動画にリアルタイムに英語の字幕を付けたりもしています(図1)。

農業分野におけるAIの利用例としては「収穫時期予想」があります。他にも安全対策としてAIの認識機能が活用されている(基礎編・第4節「安全センサ」、応用編・第3節「遠隔監視ロボット農機」)ほか、カメラの画像にもとづく品種の分別や、作物の生育状況、病害虫の判断などにも利用されます。



AIも私たちと同じように「学習」して成長する

私たちは試験勉強をするとき、いろいろな練習問題を解いて重要なポイント(特徴)を理解し、試験で出される「初めて見る問題」に取り組みます。それと同じで、AIを開発するときには、まずさまざまなデータをAIに与え、そのデータの特徴をAIに理解させます。これを「学習」といい、AIは学習で得た特徴と「初めて見るデータ」を照らし合わせて判断をします(図2)。

ここで重要な点の1つは、AIに理解させる特徴には汎用性が必要であることです。つまり、特殊な特徴ではなく、さまざまなケースに当てはまる特徴を理解させます。たとえば、「ネコ」について「尻尾が短い」と理解させると、AIは尻尾が長いネコを「ネコ」と認識しなくなってしまいます。「尻

図1 AIができること

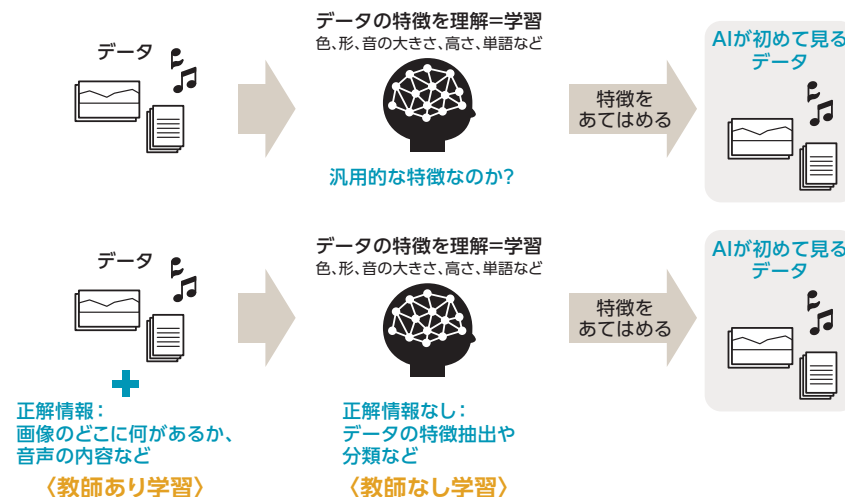


AIは、人間の視覚や聴覚のような「まわりの“世界”の認識」や、人間が行う会話のような「言葉の認識」、そして人間の予想する能力と同様の「未来の数値の予測」などができるが、近年では絵を描く、俳句をつくるなどの創造的機能も発揮しつつある。図にあげた6つ以外にも、AIができることはいろいろある。

図2 AI開発で行っていること

データの質や量は十分か？

学習方法は適切か？



AIの学習では、「汎用的な特徴」をAIに理解させる。特徴とは、画像データなら映っている物体の形状や色や大きさ、音声データなら音の高さや大きさ、文章なら使用されている単語やその単語どうしの関連性などをいう。学習の方法も「教師あり学習」と「教師なし学習」があり、前者はたとえば画像なら「画像のどこにあるか」などの正解情報を同時に与えて、データと正解情報のペアから汎用的な特徴を理解させる。以後、「教師あり学習」を中心に見ていく。

尾が短い」という特徴は、すべてのネコに対して汎用性がないということになります。

そしてもう1つ、AIの学習には、データとともに正解を与える「教師あり学習」と正解を与えない「教師なし学習」があります。

AIをつくってみよう!

AIをもっと知ってもらうために、ここでシミュレーションをしてみましょう。みなさんはAIの開発者で、今新しいAIをつくろうとしています。それは、「木になっているリンゴを検知するためのAI」です。

開発には「計画を立てる」「データ収集」「前処理」「AIモデル構築」「テスト」の5つのステップがあります(図3)。

ステップ1：計画を立てる

どんなAIにするか、まず計画を立てます。計画段階では「5W1H」と「スケジュール」の観点から考えてみます(表1)。ご存じのように「5W1H」は、「Who(誰が)」「When(いつ)」「Where(どこで)」「What(何を)」「Why(なぜ)」「How(どうやって)」の頭文字をとったものです。

なかでも「Why(なぜ)」は最も大切に、まずここから考えます。ここがきちんと明確になっていないと、AIをつくっても「使い道がなかった……」とか、「他の方法でよかった……」となって、開発が無駄になってしまふことになります。

この「計画を立てる」段階では、AIの知識だけでなく、農業そのものへの豊富な知識や経験が必要となります。

ステップ2：データ収集

しっかりした計画を立てたら、次はAIに学習させるための「データ収集」を行います。計画段階の「What」「When」「How」などに合わせてカメラでリンゴを撮影します。

AIモデルを構築して試してみても、AIの精度が低かった場合にはその都度、画像データを増やしていくようにしますが、表1の「スケジュール」にもあ

図3 AI開発のステップ 題材：AIリンゴ検知



リンゴを検知するAIは、図の上の写真のように、検知したリンゴをボックス(赤い枠)で囲んで示す。こうした「リンゴ検知AI」を開発するとしたら、図のような5つのステップで行う

表1 ステップ1「計画を立てる」：リンゴ検知AIの場合

項目	意味	主な内容
Why(なぜ)	最も重要で、AI開発の基本となる。	・リンゴを検知できる何がメリットなのか？ ・AI以外にも、他の手段はないか？
What(何を)	リンゴといってもさまざまな種類や生育段階などがあるので、それを明確化。	・リンゴの品種や生育段階は？ ・木になっているものか？ 収穫済みでも良いか？
Where(どこで)	AIを用いる場所、つまり農場を指す。写っているリンゴの背景の変化に対応する。	・AIを導入する圃場は何力所か？ ・圃場内に何力所、設置するか？
When(いつ)	リンゴの検知を、どのくらいの頻度で行うのかなど。	・1日に1回でいいのか？ ・雨や風、日照条件など、天候によらず安定して検知できることを目指すのか？
Who(誰が)	AIを開発する人もしくは使う人は誰かということ。	・開発する人、使用する人はそれぞれどのような人か？
How(どうやって)	目的(リンゴの検知)に合わせるためにどういった性能やAIモデルにするか。	・解像度はどの程度が最適か？ 画角はどうするか？ ・どのようなAIモデルを用いるか？
スケジュール	作物や果樹による季節性といった、農業特有のスケジュールがあるので、それに合わせた開発スケジュールを立てる。	・いつまでに開発するか？ ・リンゴの生育はいつごろか？

「Who」に関しては、開発者はAIの専門家だがAIを使う人は農業従事者なので、使用者がどんな人で何かトラブルがあったときにはどうすべきかを考えておけば、後で役に立つ。「How」における「どのAIモデルを用いるか」とは、それぞれ特徴があるさまざまなAIのモデルが世界中にあるので、その中から、どのようなモデルを使うべきかをあらかず。たとえば、「重い荷物をたくさん運ぶ」という目的には馬力や搭載スペースという性能からトラックという種類(モデル)が最適なのに、同じ自動車であっても軽乗用車や高級リムジンという種類(モデル)を選んでしまうと役に立たないのと同じ。

るように農業には季節性があり、リンゴの生育段階や天候などの関係で、好きなときに必要な画像を再収集するのがむずかしいので、できるだけ最初にたくさん撮影したほうが良いでしょう。高解像の4Kレベルで、500～1000枚ほどから始めます。

ステップ3：前処理

画像データを収集したら、次に「前処理」という作業をします。前処理には「水増し」と「ラベリング」の2つがあります。

水増しはデータのバラエティを増やしたり物体の特徴をまんべんなくAIに取得させるために、画像にいろいろな加工をする工程です。こうすることで、画像に映ったときの大きさや明るさや枝ぶりや果実の有無や成熟度にかかわらず「リンゴの木」を検知する能力を高めることができます(図4)。画像が不鮮明でもきちんとリンゴを検知できるように、わざと画像を見にくくする加工も行われます。

ただし、加工しすぎて現実にはあり得ないような画像をつくってしまうと、検知の難易度が上がってしまい、実際は十分に使えるレベルなのに、検知の精度が悪く感じられてしまうことになります。現実には即した加工を心がけなければいけません。

そして前処理の2つめのラベリングは、さきほど説明した「教師あり学習」の正解情報をつくることを意味します。色付きのボックスでリンゴを囲むことで、リンゴの位置や、リンゴの色別の正解情報をAIに与えて学習させます(図4)。AIはこの正解情報と比較しながら学習を続けていきます。

ステップ4：AIモデル構築

いよいよ実際にAIモデルを構築します。ここでは、法則を理解させる「学習」と、汎用的かどうかの「評価」の2段階に分けられます。

まず学習を見てみましょう(図5)。AIには、画像のどこに注目するかを定義する「重み」という値があります。その重みに基づいて、AIに1回、リンゴを検知させ、「黄色のリンゴはここ、赤いリンゴはここ」という結果を出させます。この結果を「推論結果」といいます。この段階のAIは、「リ

図4 前処理の例

データを擬似的に増やす……水増し



正解情報を作成する……ラベリング



水増しの例としては、「サイズ変化」や「明るさ変化」「反転」などの加工を行うことで、小さいリンゴや直射日光が当たって明るく映っているリンゴなど、さまざまな状況でも検知できるようにする。「ぼかし」や「一部塗りつぶし」は、見にくい画像でも検知できるようにするための加工。ラベリングは、AIに与える「画像のどこに、どんなリンゴがあるか」という正解情報を人間が作成する作業。

図5 AIモデル構築——学習



まず最初に検知させ、AIが出した推論結果と、ラベリングで作成した正解情報を照らして、誤差の計算式「ロス関数」によって誤差を計算する。次に「ロス関数の勾配」を計算してAIの重みを更新する。このプロセスを繰り返してAIのバージョンをアップデートし、より精度に高めていく。ちなみに、図にある「Neural Network Console」や「TensorFlow」などは、AIのモデル構築のための特別なソフトウェアのこと。

ンゴ検知AIのバージョン1」といえます。

次に、前処理のラベリングでつくった正解情報と、AIが出した推論結果の誤差を出します。これによって、「誤差を小さくするためには、どのように“重み”を更新すればよいか」がわかります。こうして重みを更新されたAIは、「リンゴ検知AIのバージョン2」となります。以後、このプロセスを繰り返して、バージョン3、バージョン4……と、AIのバージョンを高めていき、最終的により正解に近い推論結果が出せるAIが構築されるようになります。

学習が完了したら、次に行うのは評価です。評価では、学習で使った画像データにはなかった、まったく別の画像データを使い、この評価データに対するAIモデルの精度を検証します(図6)。

注意すべきは、必要な評価データの抜け落ちです。たとえばどんな天候でも安定してリンゴを検知できるAIを目指していたのに、晴れの日画像が抜けた状態で評価すると、実際に現場に導入したときに「このAIは、なぜか晴れの日では認識できないな……」となりかねません。いわば、評価の網の目をすり抜けた不完全な状態で現場に導入されてしまうわけです。

ステップ5：テスト

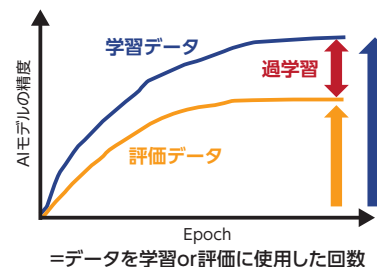
最後の「テスト」は、学習でも評価でも使われなかったデータを用いて実施します。そうすることで、仮に評価データに偏りがあって、AIの精度が誤って高くなっていたとしても、このテストの段階で未然に防ぐことが可能となります。

以上、AI開発において、各ステップでどのようなことが行われるかを見てきましたが、これによってAIの概要をご理解いただけたのではないのでしょうか。注意しておきたいのは、これらのステップは一度で終わりではなく、繰り返すことでAIは優秀になるということです(図7)。

農業分野向けのAIは開発段階だけではなく導入の際にも農業についての知識や経験が不可欠になります。農業に詳しい農業従事者が、同時にAIの正しい知識も持つことによって、農業分野へのAIの導入のハードルが下がり、現場での利用がより進むことになるでしょう。

図6 AIモデル構築——評価

学習曲線



- 学習データと評価データそれぞれの精度の絶対値と両者の差を評価
- 差が大きいほど、未知データへの汎用性が低い(=過学習)

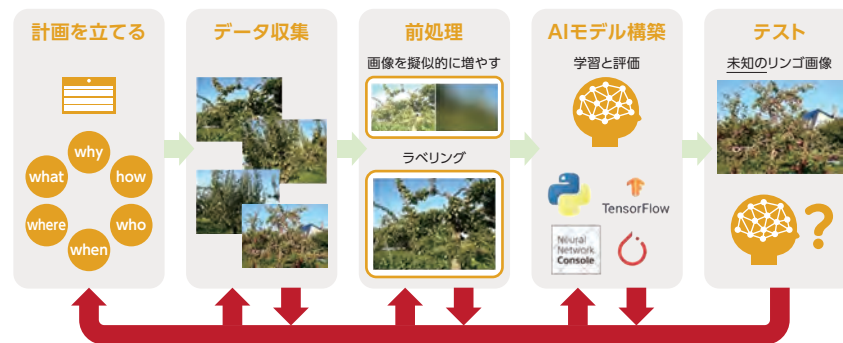
混合行列

		推論結果		
		赤リンゴ	黄リンゴ	背景
正解情報	赤リンゴ	赤リンゴを正しく検知した数	赤を黄と誤った数	赤リンゴを見落とした数
	黄リンゴ	黄を赤と誤った数	黄リンゴを正しく検知した数	黄リンゴを見落とした数
背景		赤リンゴを誤検知した数	黄リンゴを誤検知した数	

- 対角線上の数値が高いほど精度が高い
- 物体の種類を誤っている量や見落としや誤検知の量を把握できる

評価方法としては、「学習曲線」と「混合行列」がある。学習曲線は、「学習データと評価データの絶対値」と「この2つの差」がポイントとなる。学習データの値が低いと、与えたデータが複雑すぎたり、データ量が不足していた可能性がある。逆に学習データが高くても、評価データが低い「過学習」だと、未知のデータへの精度が低くなる。いいかえれば「学校の勉強はできるが、実社会では役に立たない」ということになる。混合行列は、縦が正解情報、横がAIが出した推論結果であり、リンゴの個数や色といった項目別の精度を詳細に分析できる。

図7 AI開発のステップは繰り返しとなる



各ステップは、一度で終わるわけではない。途中でデータが不足していればデータ収集を再度行うことになるし、前処理をもう一度実施することもある。

ドローンの基礎

近年ではテレビ番組の撮影でもドローンが使われており、今までは見ることができなかったような興味深い映像を撮影できるようになりました。さまざまな分野でドローンの活用が増えてきましたが、それは農業分野でも例外ではありません。

スマート農業では、農業の省力化・効率化を目的として、ロボットトラクターなどの車両ロボットの他に「ドローン(無人飛行体)」のさらなる導入が必要とされています(写真1)。この章では、農業用ドローンについて解説していきます。

無人の航空機は「UAV : Unmanned Aerial (Air) Vehicle)」と呼ばれ、ドローンもこのUAVに含まれます。そもそも「ドローン」という名称は、英語で「働き蜂」を意味し、飛行するときの音が蜂の羽音に似ていることから付けられたといわれていますが、その他にも諸説あります。

ドローンの中には翼のついた飛行機(固定翼機)のようなものもありますが、現在農業用として使用されているドローンは、浮き上がるための揚力を複数のプロペラで発生させる、ヘリコプター(回転翼機)のような形式が一般的です。ただし、それぞれのプロペラの揚力をバランスよくとることができないと機体が不安定になります。ちょうど「やじろべえ」のようなもので、重心部分の機体と、左右の重りに相当するプロペラが、空中でバランスを取っているわけです(写真1)。

ドローンは、プロペラの数によって、いくつかのタイプがあります(図1)。プロペラの数が増えるほど電力が必要になりますが、空中でバランスをとりやすくなるので信頼性が向上します。

基本的に、ドローンは「プロポ」と呼ばれる、2つのスティックがついた送信機を使って人が操縦します。左スティックで「前進・後進・機体の左回転・機体の右回転」、右スティックで「上昇・下降・左移動・右移動」を行います。日本ではこの操作形態(モード1)が主流となっています。

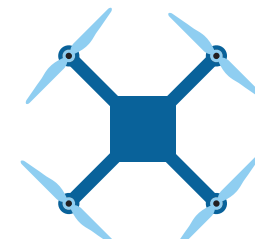
写真1 圃場や作物の診断情報を収集するドローン



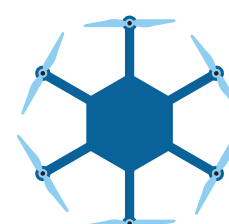
図1 いろいろなタイプのドローン



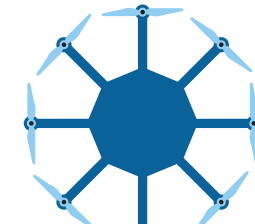
トライコプター



クアッドコプター



ヘキサコプター



オクトコプター

プロペラが3つのものを「トライコプター」、4つのものを「クアッドコプター」、6つのものを「ヘキサコプター」、8つのものを「オクトコプター」と呼ぶ。プロペラ数が多いほうが、空中で安定しやすい。

農業用ドローンに期待されている利用分野

農林水産省農産局技術普及課がまとめた「令和2年度 農業分野におけるドローンの活用状況」によれば、農業におけるドローンの活用状況は「農薬散布」「肥料散布」「播種」「受粉」「農産物等運搬」「圃場センシング」「鳥獣被害対策」の7分野が主なものとなっています。

①**農薬散布**：最も活用が広がっている分野です。当初、農薬の散布作業は有人機で行われてきましたが、農地がせまく、区画もまちまちで山間部なども多かったことから、正確で安全な農薬散布を行うには限界がありました。このため、無人ヘリによる航空防除が導入されるようになりましたが、無人ヘリは導入・維持コストが高く、操縦技術を習得するのにも時間がかかるという難点がありました。

このため、今日では低コストで操縦技術の習得にあまり時間がかからないドローンの防除作業での活用が広がっています(図2)。それに合わせて、ドローンの使用における制度の改正、使用できる農薬や作物の範囲の拡大など、使用環境の整備が進んでいます。

②**追肥散布**：応用編・第6節で述べるように、スマート農業では画像認識技術やAI解析技術の導入によって「リモートセンシング(遠隔観測)機能」が大幅に向上します。このためドローンは、圃場の観測を自律飛行で行い、その結果にもとづいて、作物の生育や土壌の肥沃度に合わせた適時・適量の自動追肥が可能となっています。

③**播種**：現在、ドローンによる水稻圃場の播種、つまり「種もみ^{じかまき}直播技術」の実証実験などが行われており、その結果、実用化レベルになりつつあります。ドローンによる直播は、育苗や田植え作業をしなくてすむので省力化が期待でき、労働力不足の解決につながると考えられています。

④**受粉**：果樹の受粉に関しては、さまざまな実証実験が各地で行われています。たとえば、東光鉄工(株)と青森県名久井農業高校との共同実験では、リンゴの花粉溶液の空中散布を5年間実施し、結実率で十分に実用に耐えられる結果となりました。また、結実率を上げるために溶液にホウ素を混入する試みも行われています(図3)。

⑤**農産物などの運搬**：過疎地に住む高齢者への宅配などにドローンを導

図2 ドローンの防除作業での活用

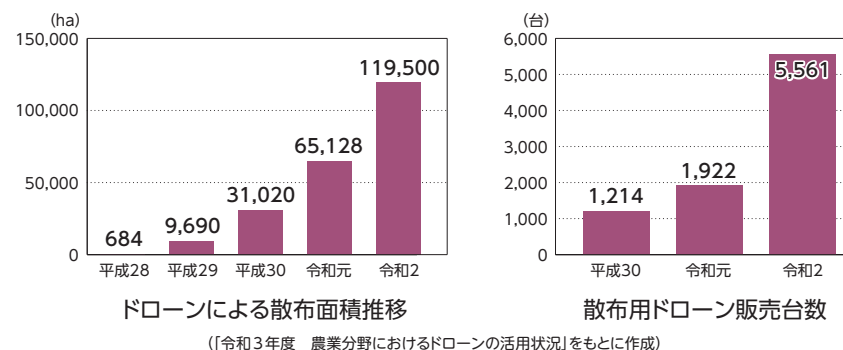


図3 ドローンによる受粉実験(東光鉄工・名久井農業高校共同)

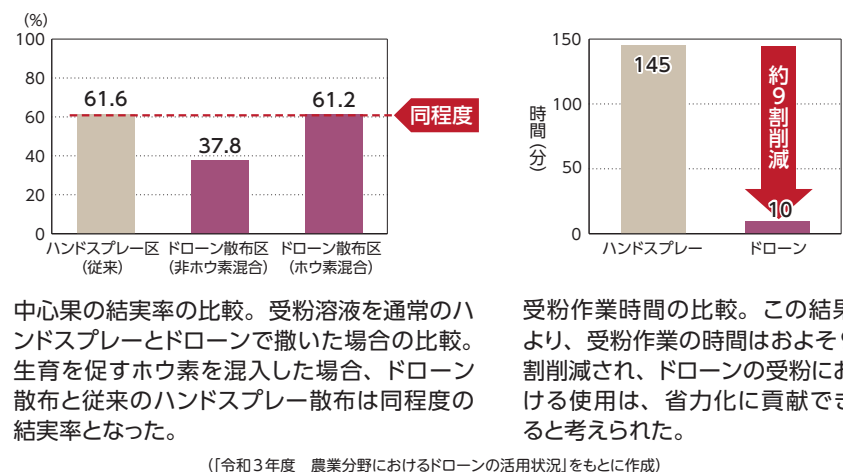


写真2 農産物の運搬の実証実験



この実験では、離陸から3kmはなれたところへの着陸までを自律飛行で行った。飛行時間は10分間。(写真：東光鉄工(株))

入する実験などが、ニュースなどでも取り上げられています。農業分野においても、農産物の運搬などでの利用が期待されています。搭載量や安全性など解決すべき問題点がありますが、実際にさまざまな実証実験が行われています(写真2)。

⑥圃場センシング：②追肥散布でもふれましたが、ドローンを使って作物の生育状況、病害虫の発生状況、土壌の肥沃状況などを測定・評価し、それぞれの圃場に適した対策を立てられるようになります(図4)。

⑦鳥獣被害対策：ドローンを使って害獣の個体数の把握、見回りや餌やりの自動化、害獣捕獲のための罠の管理などを行うもので、夜間でも視認して追跡できる強力なLEDライトや、警告・威嚇のための高出力スピーカーなどをドローンに搭載することが考えられています。また、害獣の行動は予測不能なので、どんな天候でも運用できるよう、ドローンに防水・防塵機能を持たせることも必要となります。防水機能は、使用後のドローンの水洗いを容易にするので、運用効率の面で必須といえます。



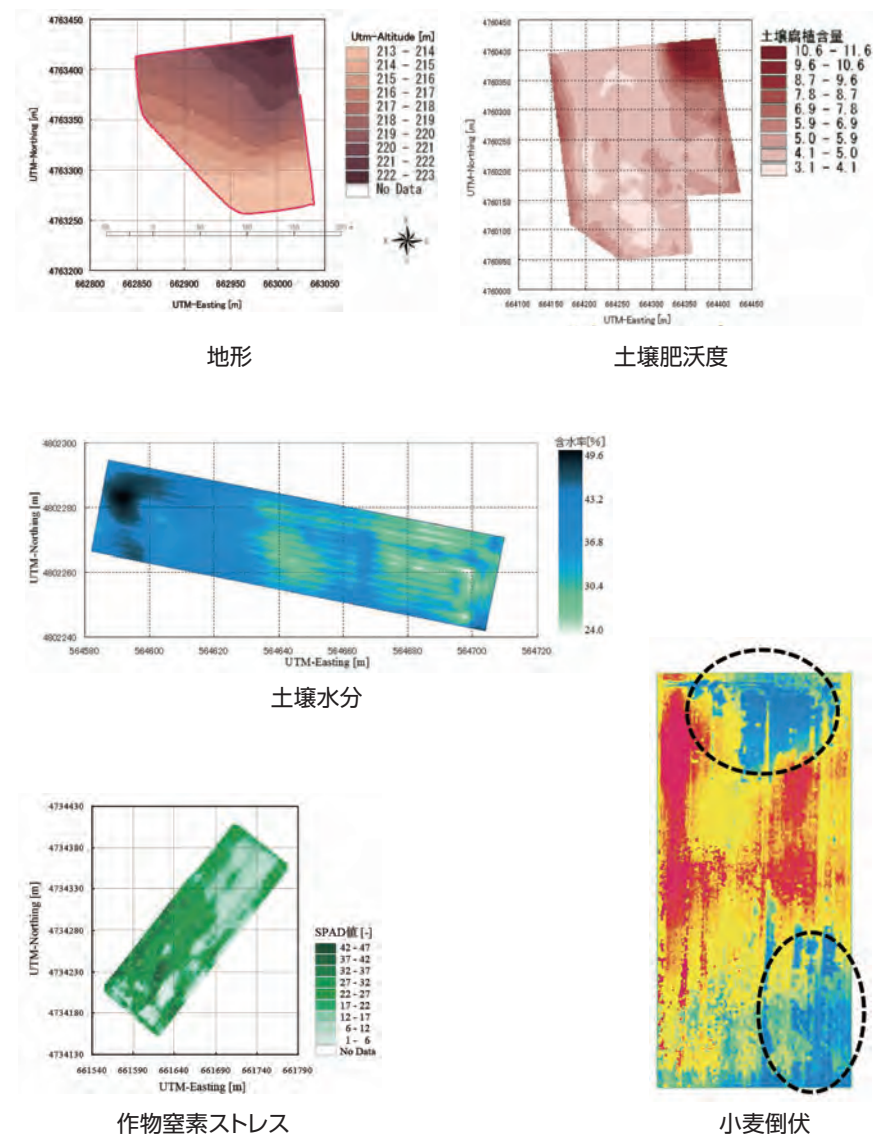
現在のドローンの主な機能

このように、ドローンにはさまざまな利用分野がありますが、農業用ドローンにはどのような機能や特徴が備わっているのでしょうか。メーカーや機種によって違いはありますが、用途に十分な搭載量があること、ある程度の飛行速度があること、障害物検知や高度維持のためのセンサを持っていることなどがあげられます。

この他にも、操縦や運用を容易にするための補助機能も必要となるでしょう。たとえば、農薬などの散布の場合、飛行ルートを設定すればあとは人が操縦することなしに自律飛行して散布する自動飛行モードや、初心者が操縦する際のふらつきを自動補正する機能などです。

ドローンの性能や機能については、ドローンを利用する目的を理解したうえで、各社のドローンを検討して導入することが大切です。

図4 ドローンを活用した圃場センシング



ドローンによってこうした情報を得られれば、圃場ごとの状況が正確にわかり、その圃場に合わせた最適な対策を講じることができる。

今後ドローンに期待される機能とは？

現在でもドローンは農業分野で活用されていますが、より充実した運用をする上でドローンに求められている機能としては、どのようなものがあるのでしょうか。

まず、より高度な「完全な自律飛行による効率化」です。これによって、センサや画像解析にもとづいた正確なルートで自律飛行することが可能となります。また、故障したときに2系統以上のシステムを切り替えることで事故を防ぐ「より高い安全性・信頼性」も重要となります。またバッテリー技術の向上による「さらなる長時間飛行の実現」があげられます。これらは、農薬散布などを行う際に必要となる機能です。もちろん、「搭載量の増加」も重要です。

情報データの面でも、「圃場情報の正確な把握」や「圃場データをクラウドに蓄積して柔軟に利活用する」ことが重要で、さらにドローン以外から得られたデータと連携させる「センシングデータの連携・統合」も必要です。

この他、「悪天候でも飛行できる全天候性」も、特に鳥獣被害対策では重視されると見られます(表1)。

ドローンを活用するための法整備の現状

2022年に航空法が大幅に改正されました。ドローンに関連する項目は、以下のようになっています。

①**機体情報の登録制度**：今までの「200 g以上の機体」に代わって「100 g以上の機体」について、所有者や機体の情報を登録してICチップをつけることで、飛行中に機体情報を発信することが義務付けられました。また、3年で登録を更新することや、整備点検が義務となるので注意が必要です。

②**機体認証制度**：改正航空法にあるカテゴリーⅢの「レベル4(有人地帯での補助者なし目視外飛行)」を行うドローンに対して厳格な検査が実施されることになりました。ただし、農業用ドローンはほとんどがカテゴリーⅡに区分されるものなので、有人地帯を飛行させる場合ほどの厳しい基

表1 利用分野別に見た今後ドローンに求められる機能

利用分野	求められる機能
農 薬 散 布	- 完全自律飛行による作業の効率化 - 安全性/信頼性のさらなる向上 - 長時間飛行の実現
肥 料 散 布	- 圃場情報の正確な把握と対策機能 - 圃場データの蓄積と利活用機能 - センシングデータの連携と統合
播 種	- 種もみの正確な散布機能 - 搭載量の増加
受 粉	- 溶液の混入方法の改善 - 自律飛行 - 結実率の向上
農 作 物 等 運 搬	- レベル4飛行※の実現 - 安全性/信頼性のさらなる向上 - 長時間飛行の実現
鳥 獣 被 害 対 策	- 悪天候下での飛行 - 警告、追尾機能 - 安全性/信頼性のさらなる向上 - 長時間飛行の実現

※「レベル4」とは、飛行制限の厳しいエリアで、改正された航空法においては、「有人地帯での補助者なし目視外の飛行」とされている。

写真3 ドローンが農業の姿を変えていく



物資輸送中のドローン

農薬散布に活躍するドローン

準は求められていないようです。

③**技能証明制度**：ドローンの操縦には免許が必要となりました。一等級と二等級があり、前者は「レベル4」の飛行ができるほどの高い操縦技術が必要となります。

④**運航管理ルール**：飛行計画の事前通知や飛行日誌の作成、飛行後の報告などが義務付けられています。また、事故があった場合の報告や、万一負傷者が出た場合の救護が義務化されています。

今後、ますます活躍の幅を広げるドローンから目が離せません(写真3)。



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が。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

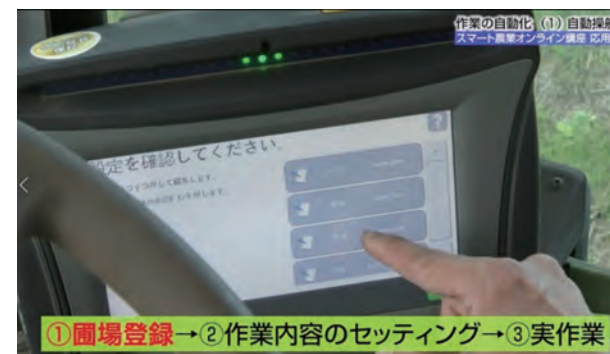


写真6 圃場の登録を行う

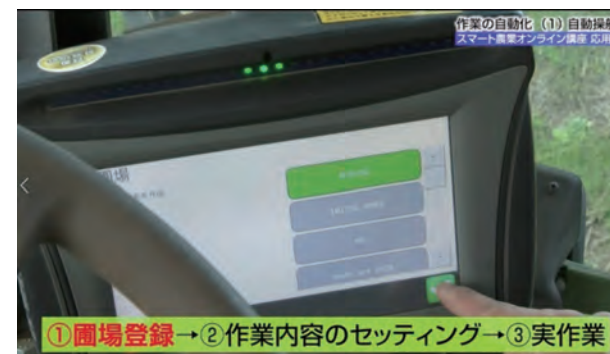


写真7 キーボード画面で圃場の名前を記入

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。

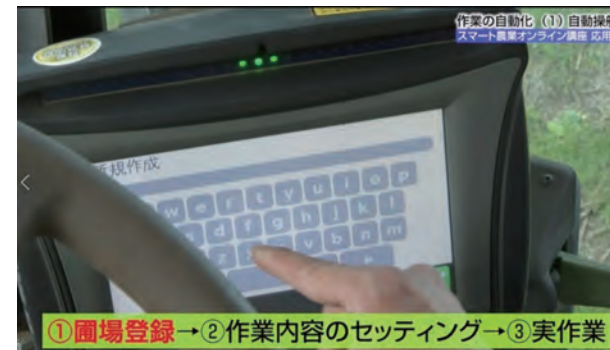


写真 8・9 圃場の外周に沿ってトラクターを走らせる

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。

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



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。

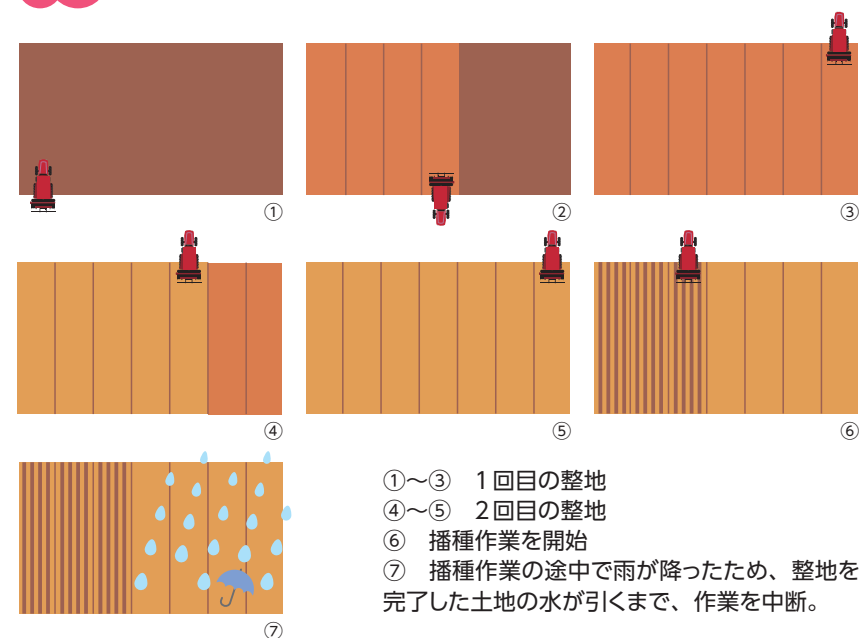
そして播種作業を行います。その途中で天候が悪化し、雨が降ってきたとします。この段階で播種作業は中断し、整地後の雨による水が引くの待たなければなりません。

図1 整地と播種の工程



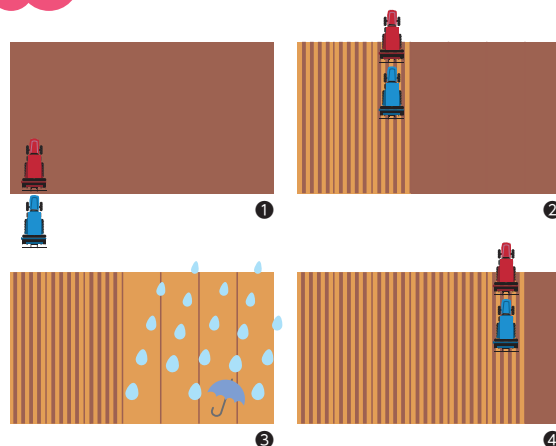
農作業ロボットによる作業体系では、2回目の整地作業と同時に、有人トラクターが播種作業を行う。

図2 通常の慣行の場合の作業体系



- ①～③ 1回目の整地
- ④～⑤ 2回目の整地
- ⑥ 播種作業を開始
- ⑦ 播種作業の途中で雨が降ったため、整地を完了した土地の水が引くまで、作業を中断。

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ず、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

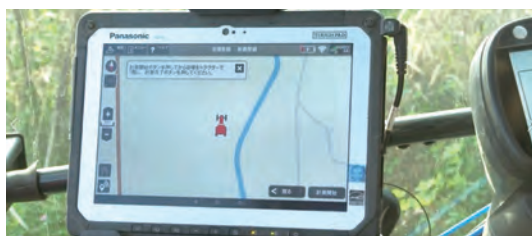


写真7
トラクターの場所が表示される



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



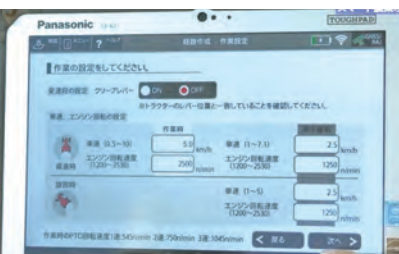
写真10 作業機としてサブソイラを選択



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

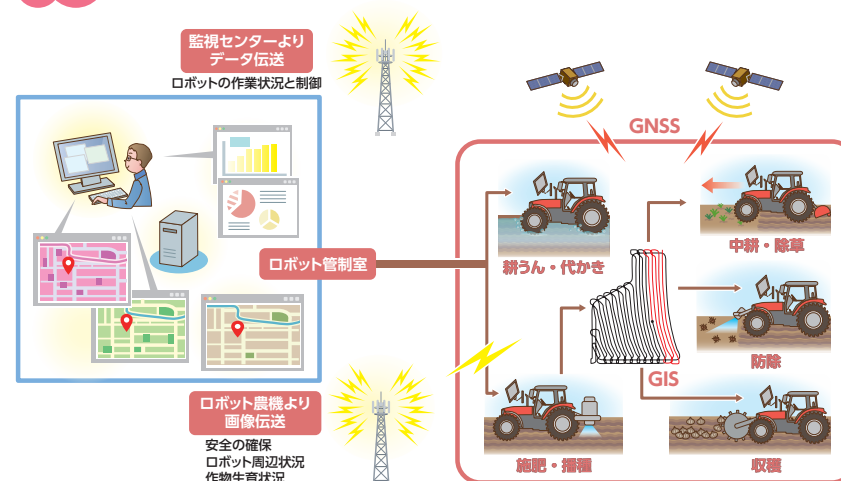
電波を使って離れたところから監視するわけですから、ロボット農機からの映像が遅れるようでは、障害物や人にぶつかる可能性が高くなって非常に危険です。そもそも映像情報はデータ容量が大きく、その大容量の情報を高速で送れなければならないのです。仮に実用化されたとしても、通

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。

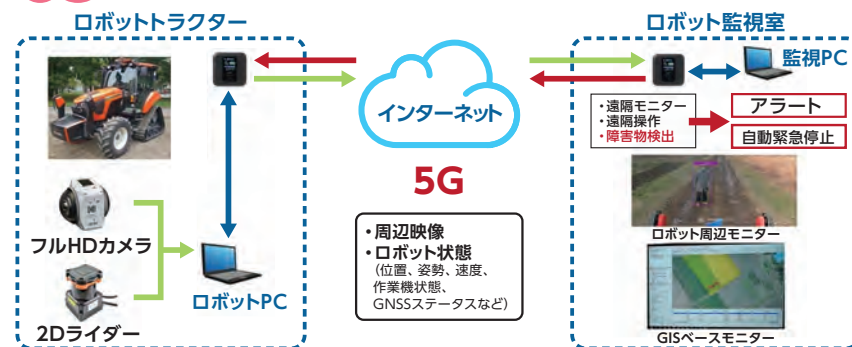
通常、遠隔監視ロボット農機には、高い精度で位置を計測できる装置の「RTK-GNSS受信機」と、車体の傾き(姿勢)を測るセンサの「IMU」が必ず必要となりますが、さらに農機周辺を認識するセンサも重要です。

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。

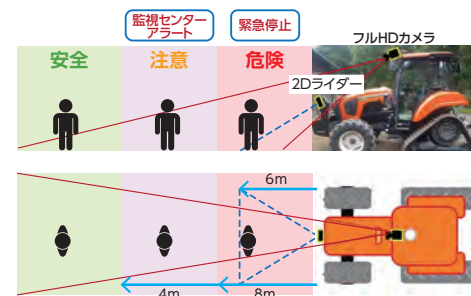
伝送の遅延・タイムラグが大きくなって対応が遅れることもありえますが、そのときは2Dライダーで検知してロボット農機側が処理して、自動的に停止するしくみとなっています。いわば、安全対策が二重、三重に施されているわけです(図4、写真1、2)。

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

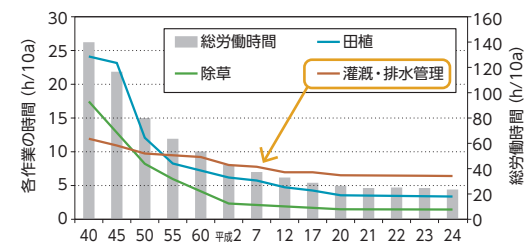
日本の用水路は、水路が露出していて目で見えることができる「開水路」と、地中に埋められたパイプラインで水を送る「管水路」に大別され、現在整備されているもののおよそ7割が、管理が大変な管水路です。

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

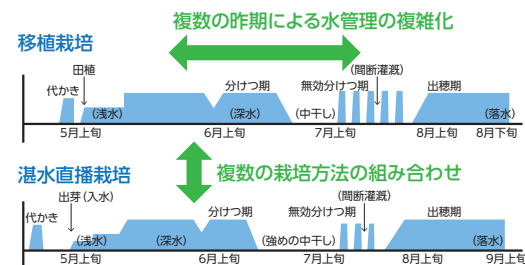
総労働時間の約3割を占める！



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



開水路で使用する自動給水装置。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

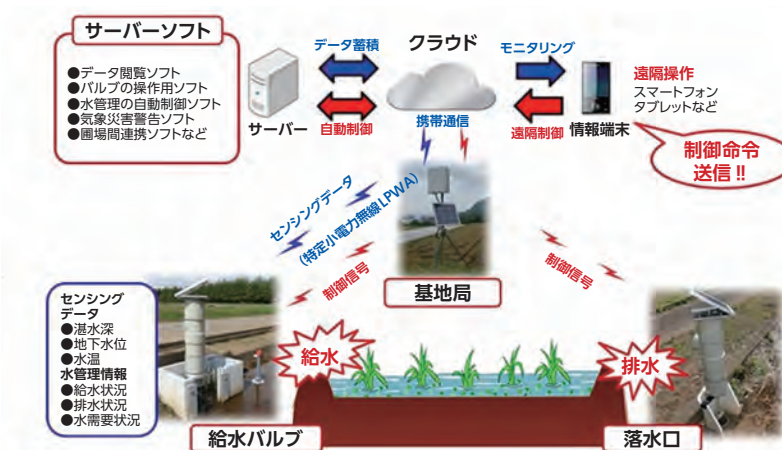
従来の自動給水装置は、用水路に設置される給水装置のみによる自動化でしたが、ICT水管理システムは、クラウドを介して全体が情報システム化されたものとなり、それによって①自動化、②デジタル化、③スマート化の3つが可能となります。

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)。

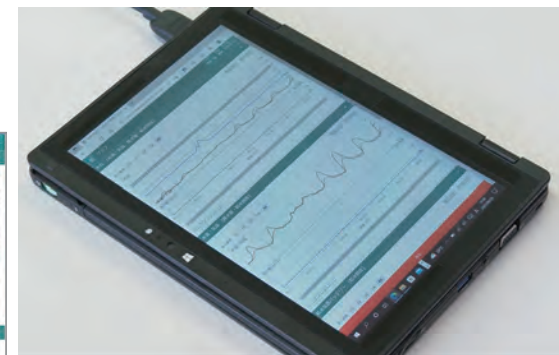
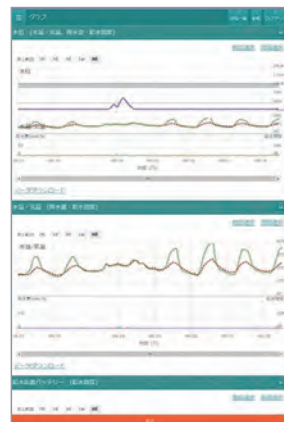
ニーズに合ったものを選ぶことは当然ですが、先にも述べたように「水深や給排水の水管理におけるデジタル化」に対応し、最終的に「水管理のスマート化」を実現できるシステムを選ぶことが重要といえます。

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

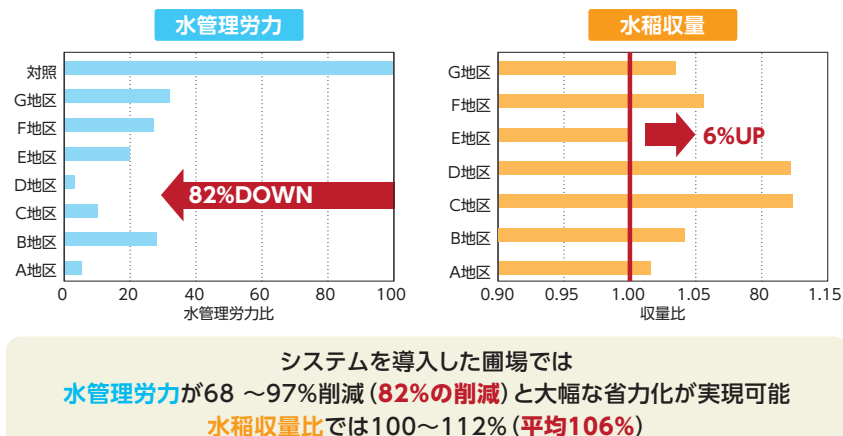
今後は、ICT水管理システムのスマート化が進むことが予想されます。品種や移植日やその地点を登録し、それらと作物の発育モデルを連携させることで、気象状況や作物の生育レベルに合わせた水管理を自動で適時行うことが可能となります。

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。

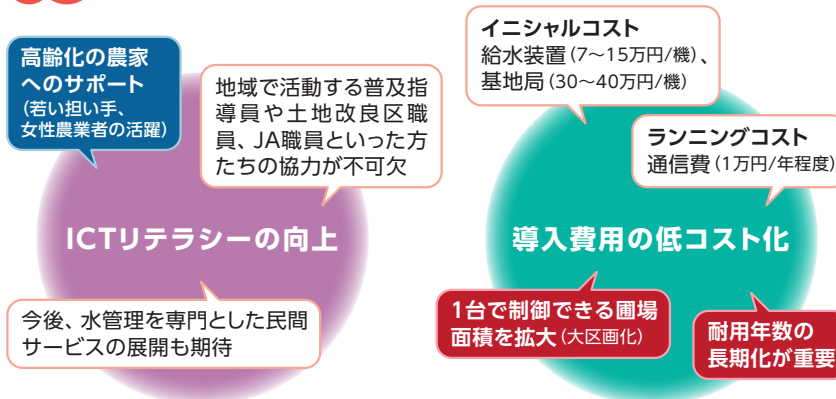
図4 ICT水管理システムの実証試験結果



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。

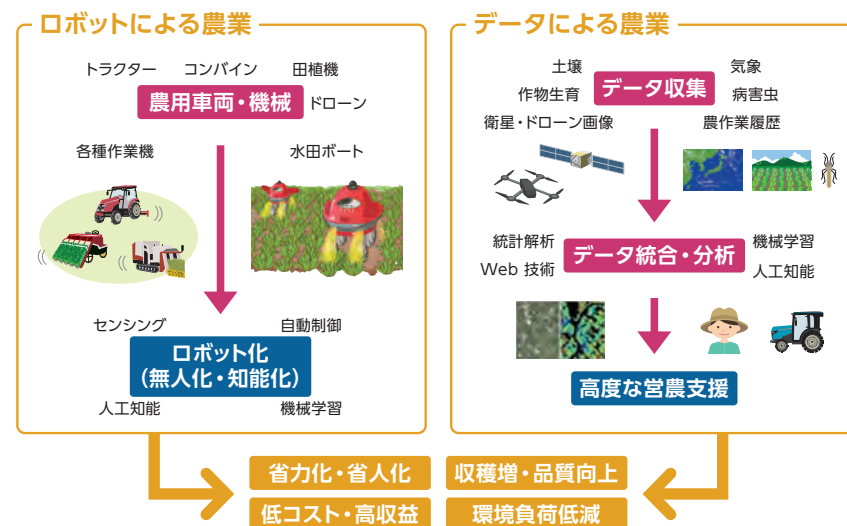
このように、今後は農業のICT化が進み、「ロボットによる農業」と「データによる農業」がますます発展していくと見られています。データによる農業の目標は、「熟練農家の知識・知恵をデータ化して継承」「農業の魅力向上と、新規就農の促進」「生産・加工・流通の連携による6次産業化^{*}の促進」などです。

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)。

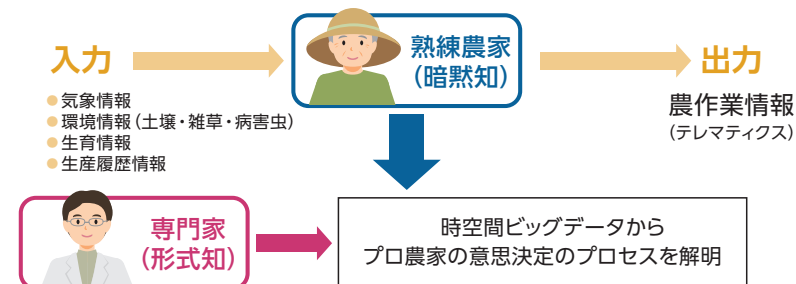
具体的な流れを見てみると、作業中の農機やドローン、人工衛星、圃場

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。

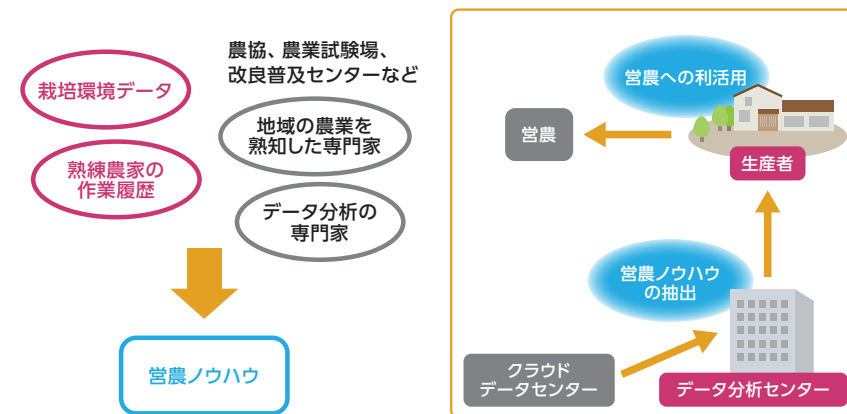
図2 営農ノウハウの抽出・データ化



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。

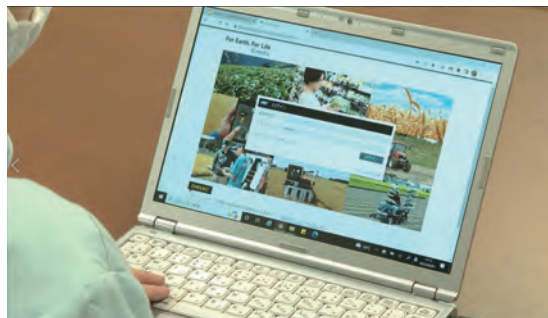
図4 営農支援システム KSAS

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。

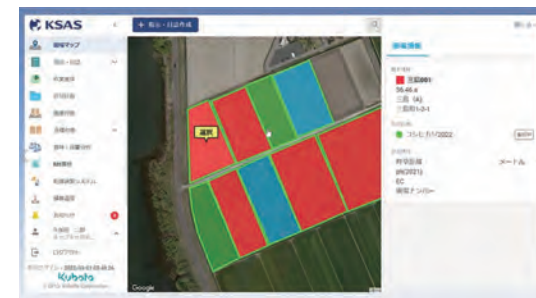


写真3

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

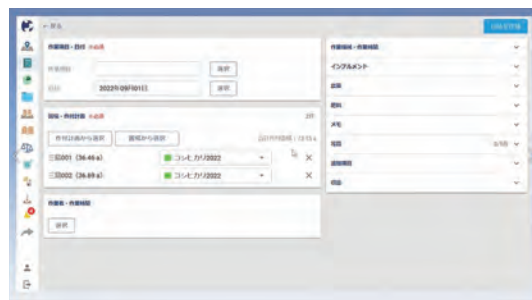
以後、同じ手順で登録をしていく。



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。

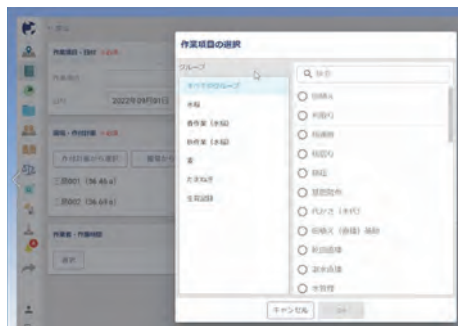


写真 7



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)。

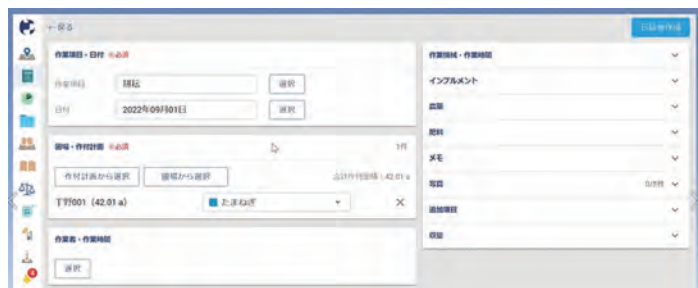
写真 8～10 作業進捗

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。



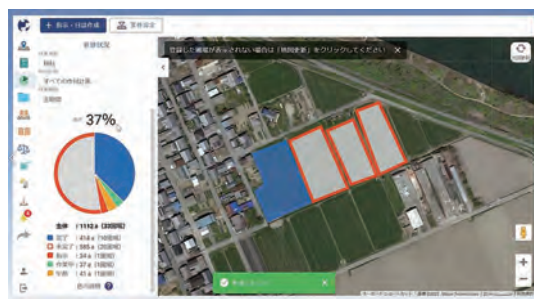
写真 9



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

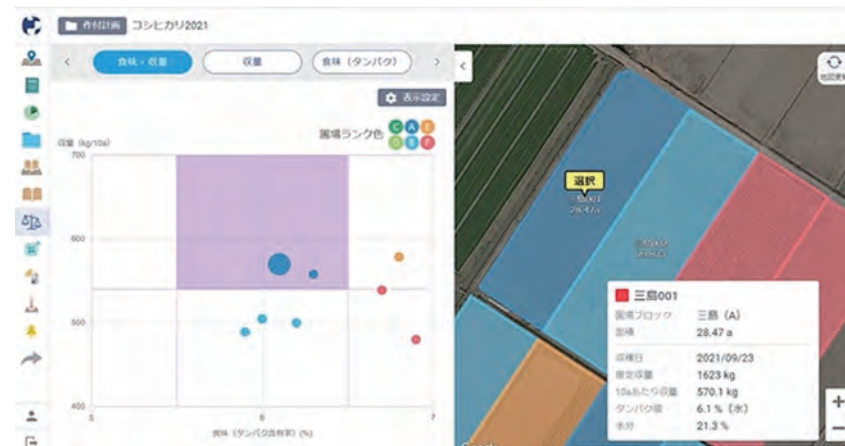
しっかり栽培計画を立てたのに資材費の管理が大雑把になったり、無駄な出費を抑えたいけれどどこに無駄があるのかわからないなどということがあります。

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るようになります。

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

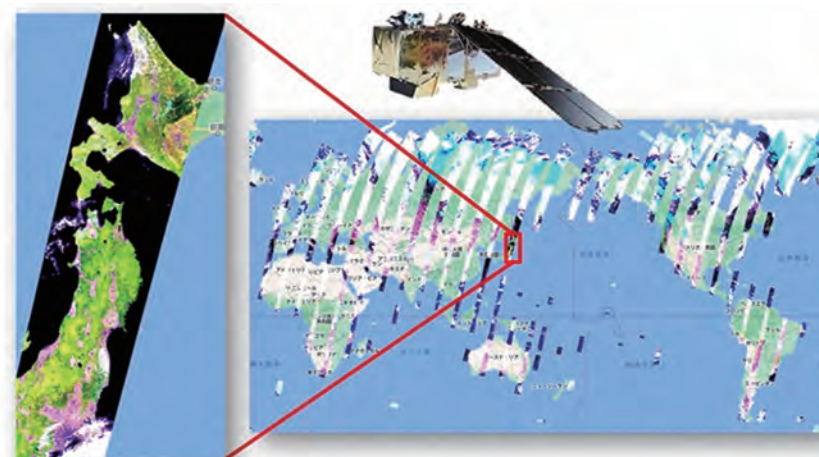
衛星リモートセンシングで使用されるセンサーについて、ここではセンチネル2の光学センサーを例に見てみましょう（図2）。

「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)	
10m	2	青	490	} 多くの地球観測衛星に搭載
	3	緑	560	
	4	赤	665	
	8	近赤外	842	
20m	5		705	
	6	レッドエッジ	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

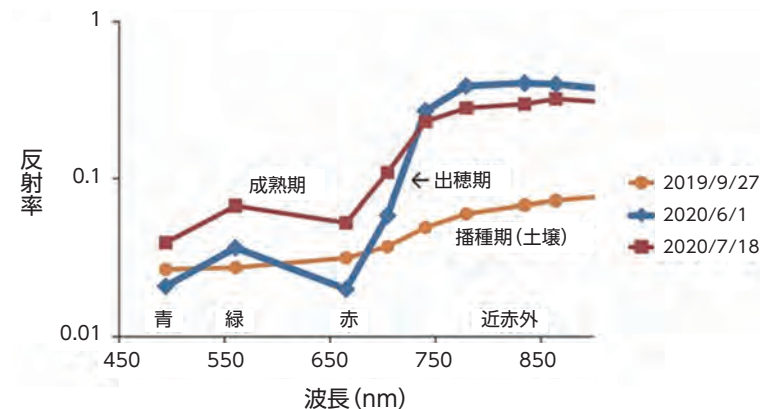
リモートセンシングで植生や土壌のようすを見る際には、可視光(青、緑、赤)や近赤外が対象物で反射される「反射特性」を観測します。

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)

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

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

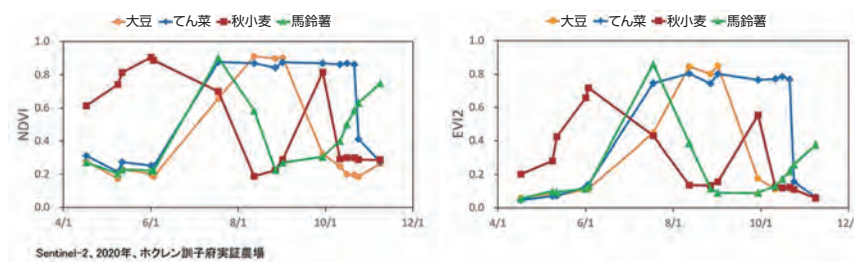
拡張植生指数 (EVI)

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

2バンド拡張植生指数

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

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。

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。

「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。

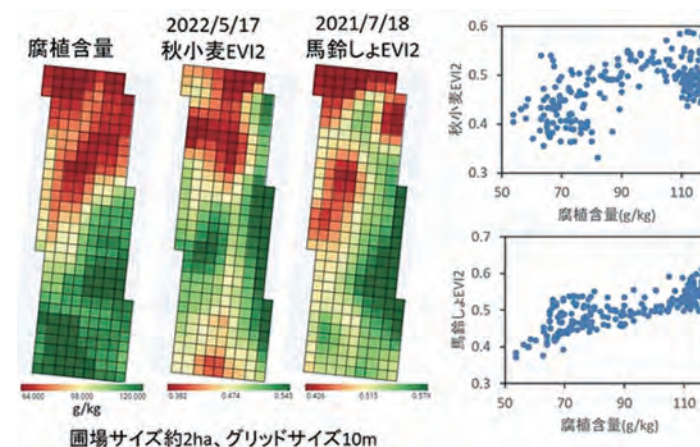
衛星リモートセンシングの実例

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



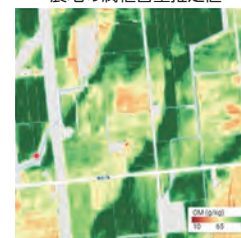
図はホクレン訓子府実証農場をセンチネル2でセンシングしたデータ。左の3つの図の1マスは10m四方を表し、「腐植含量」では値が高いほど緑色となる。秋まき小麦と馬鈴薯のEVI 2は、生育が良いところが緑。腐植含量が高い所でEVI 2の値も高くなっており、圃場の茶色の部分を中心に窒素肥料を増やす可変施肥を行えばよい。

図8 土壌の腐植含量推定

Sentinel-2 トゥルーカラー
2020/6/1

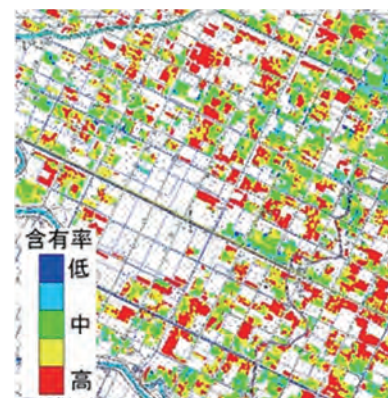


上の画像は腐植含量が低い所が黒く映っており、下の推定値の画像ではその部分が濃い緑で示されている。



志賀ら(2022)

図9 米のタンパク質含量のマップ化



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。

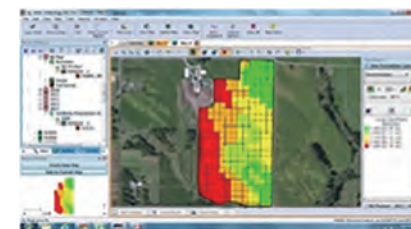
図1 センサベースとマップベース

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）
※本州では水稻

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



土壌センシング



収量センシング



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

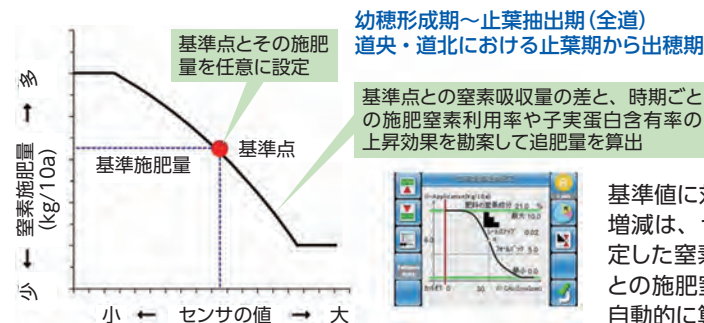
^{*}粗原収量：畑で採れたままの状態の収量。

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



基準値に対する施肥量の増減は、センサ値から推定した窒素量と、時期ごとの施肥窒素利用率から自動的に算出される。

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（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



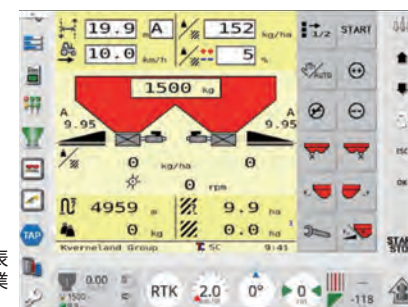
車両に設置されるコンソール端末。生育センサがとらえた生育量を施肥量に変換して、実際に肥料を撒く作業機に送る

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)。

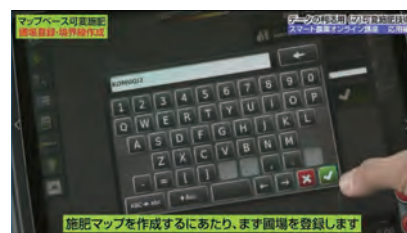
次に施肥マップの作成の流れを見ます。まず、該当する圃場の生育データを読み込んで、そのデータを表示します(写真10、11)。

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



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

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

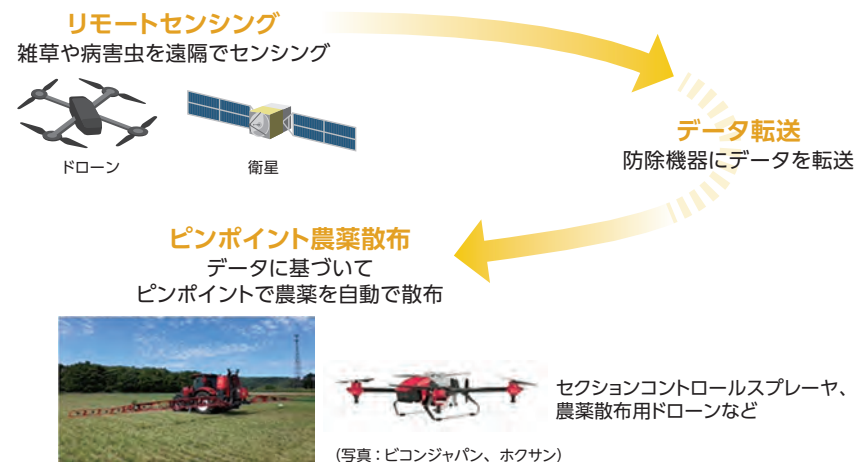


事業における作業のようす



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》

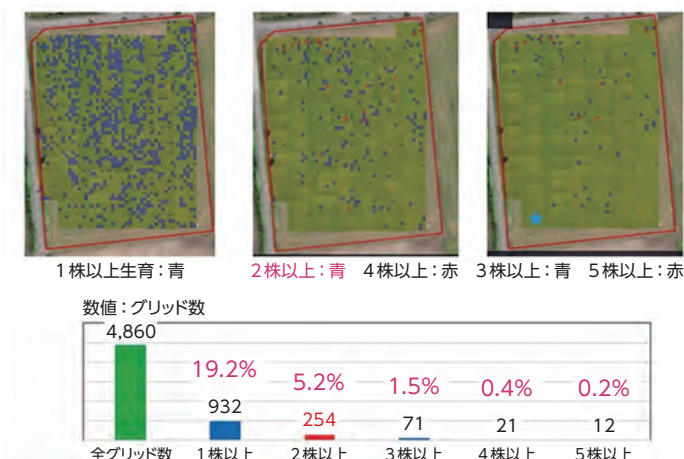


害を発見し、その解析データを防除機器に転送します。そうして得られたデータに基づいて、農薬散布用ドローンや、セクションコントロールが可能なスプレーヤなどの防除機器がピンポイントで自動的に薬剤を散布します。

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、満タンに入れると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)。

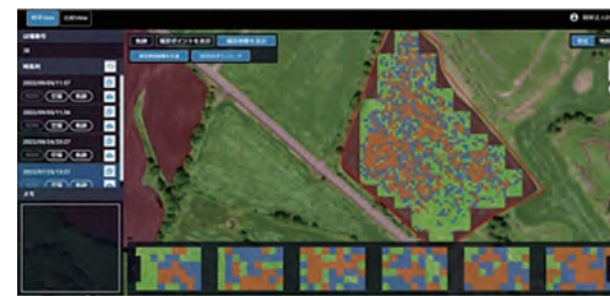
ただし、技術的には可能となっていることから、各試験研究機関や農薬メーカー、ICTベンダー(販売供給元)などが連携し、いずれは農薬散布用ドローンによるピンポイント散布も可能になるとみられています。

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。



第1章と第2章の内容は、2022年度の事業として制作したものです。スマート農業の現在地を理解する上で必要な項目を厳選し、ビデオ教材とセットで制作しました。この第3章では、第1章と第2章の内容を補完する項目をリストアップし、2023年度の事業としてスマート農業教育拠点運営委員の先生方と議論しながら、6つのコンテンツを新たに制作しました。2023年度におけるスマート農業の方向性を紹介する内容を含むことからトレンド編と名付けました。施設園芸のスマート化、小型スマートロボット、スマート農業の農作業安全、スマート農業の経営効果、スマート土壌診断技術、国外のスマート農業を解説しています。これらのコン

テンツは、私達が農林水産省スマート農業教育拠点事業で行っている研修事業の参加者の皆様からのご要望を汲み取ったものでもあります。トレンドを意識し、まだ開発途中の技術も積極的に取り入れています。ビデオ教材とセットになっているのは、第1章、第2章と同様です。

2022年度版のフォローノートを手にとっている方には、この第3章が新規コンテンツに当たります。スマート農業の農作業安全とスマート農業の経営効果については、第1章と第2章の内容と関連づけて利用いただくと、意義深いものになると考えています。本書がスマート農業へ関心を喚起し、必要とされる方に届くことを願っています。



施設園芸と環境制御技術

農業は作物の栽培、つまり「植物」を相手にする産業です。植物の体の約90%は水分で、残りの乾物部分は炭素(C)、酸素(O)、水素(H)が90%を占めています。それ以外のカルシウムや窒素、カリウムなど肥料成分である無機物も大切ですが、植物の体を主に構成している炭素、酸素、水素は、デンプン(糖)を元にしています(図1)。そしてこの重要なデンプンは、CO₂(二酸化炭素)と水に光合成による光エネルギーが加わって作られるのです(デンプンとともに酸素も産生されます)(図2)。

ハウスなどの施設園芸で、こうした光合成という基本的な営みを行う植物を栽培するためには、日射量や温度、CO₂濃度をはじめとする環境を制御する技術が重要になります。つまり温度だけでなく、灌水や肥料、CO₂濃度、湿度をモニタリングしコントロールすることが必要で、そのためにはこうした環境要因をデータとしてとらえることが重要となります。

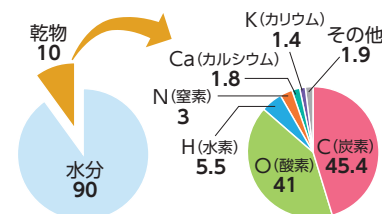
データに置き換えることはスマート農業への入り口

この「環境要因をデータとしてとらえる」ことが、スマート農業の第一歩となります。

スマート農業の効果としては、ロボット農機や自動水管理システムなどによる「作業の自動化」、位置情報や作業記録などをデジタル化・自動化することによる「情報共有の簡易化」があり、この他に衛星やドローンによるセンシングや、AI(人工知能)解析によって作物の生育や病害虫発生を予想するなど「データの活用」もあげられます。このことから、環境要因をデータとしてとらえることがスマート農業への第一歩だということがわかるでしょう。

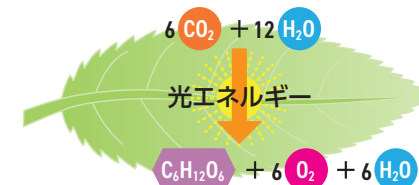
人間の健康診断でも、さまざまな数値から自分の現在の健康状態がわかります。それと同じく、温度や湿度も「暑い」「寒い」ではなく数値でとらえ、またCO₂濃度のように五感では感知できない環境をデータに置き換えることが重要となります。つまり、ハウス内の環境を、世界のどこでも通じる客観的なデータ(数値)として「見える化」する

図1 植物の体を構成しているのは糖



植物体の乾物部分の約90%はC、O、Hで構成されている

図2 植物生産の基本は光合成



環境制御技術は、光合成速度を増大させること

図3 ハウス内環境の「見える化」は重要



ことが重要です(図3)。

「データ」に対する考え方

個々のハウスでデータをとらえてコントロールする

数字のデータというと、収量データや温度計による気温などが頭に浮かびますが、最近では各社から各種モニタリング装置が発売されており、ハ

ウス内のさまざまな環境データを簡単に収集できるようになりました。この他にも、作物の生育調査データも重要となります。

ここで、データを「料理のレシピ」に例えて考えてみましょう。料理を作る上で、調味料の量や煮込む時間などの料理のレシピはインターネットなどから簡単に得ることができ、これに基づいておいしい料理が作れます。でも、料理は家庭や状況ごとに少しずつ違ってきます。夏に汗をかきながら帰宅する家族を思って、一般のレシピよりも塩分をすこし多めにすることもあるでしょう。太り気味の家族を気遣って、糖分や脂肪を抑える場合もあるでしょう。

施設園芸においても同じで、「一般的な管理データ」にしたがうのではなく、「それぞれのハウスのモニタリング装置のデータ」に基づいて最適にコントロールすることになります。データを見ながら臨機応変に対応することが大切なのです。

栽培に必要なデータは3つある

施設園芸において栽培に必要なデータは、大きく分けて3つあります(図4)。1つめは、日射量やハウスの内気温・外気温、ハウス内の湿度やCO₂濃度などの「環境データ」です。

2つめは、主に生育調査から収量や葉長・茎径などを数値化した「植物体データ」です。

3つめは、誰が・どこで・何時間働いたか、また個々の作業はどれくらい時間がかかったかなどをデータ化した「労務データ」で、農業という経営活動を行っていく上で必要なデータです。

作物の根の状態や、花の色・花自体の状態など数値化しにくいものについては写真に撮って画像データとして保存します。

データを集める時に注意しなければいけないのは単位です。温度なら「℃」、日射量なら「J(ジュール)」または「W(ワット)」に、湿度なら「%」または「g/m³」にというように揃えることが重要で、これを「プラットフォームの共通化」といいます。感覚ではなく数値でとらえようとしても、単位がバラバラであっては、正確な比較対照ができなくなってしまうからです。

図4 栽培に必要なデータとは？



データの種類

- ・環境データ： 日射量、気温、湿度、CO₂濃度 など
- ・植物体データ： 収量、葉長、茎径 など
- ・労務データ： 就労時間、各作業工数 など

データの分類

- ・数値に表せるデータ： 日平均気温○○℃、灌水量○○L/10a/日 など
- ・数値に表せないデータ： 根の状態、花の状態、→写真に撮る
※現状では正確に表すのが非常に難しい

図5 データ解析のポイント

決まった最適値はない

- ・最適な気温、最適な茎径はない
→状況により変化
- ・目標値はある

①データを比較する

- ・昨日と今日のデータ、他の生産者のデータ

②中長期的に見る

- ・植物体は、数日間の環境に影響する

③変化を確認する

- ・目標値に対して数値が上下してもすぐに変更しない。
様子見の時間が必要
→数値の追いかけてこさない

図6 必要に応じたデータ解析

短期的での解析

- ・1日～7日ごと
- ・日々の設定変更 など

中期的での解析

- ・週単位、月単位
- ・植物体の変化 など

長期的での解析

- ・年単位
- ・栽培管理全般
- ・前年度との比較

目的に応じたデータ解析が必要！

データ解析のポイント

収集したデータを活用するには解析が必要です。解析の際にまず気を付けなければならないのは「決まった最適値はない」ということです。例えば温度を設定する場合でも、目標値はあっても、実際には状況に合わせて最適な温度は変わっていきます。そのため、データはしっかりと集めてどのようにデータを使うかを常に意識することが大切です。

次に大切なのは「データを比較する」ことです。今日と昨日、今週の平均と先週の平均、月ごとの平均、さらに他の生産者のデータなどとも比較して、変化を確認することが重要です。その際、数値をグラフ化すると、数値の変化のようすがひと目でわかるようになります(図5)。

また、データの解析は目的に応じて行います(図6)。

図 7 スマート農業による「環境にやさしい農業作り」

LSスクリーン

保温による省エネ
灯油使用量削減



「みどりの食料システム戦略」

に沿った生産性向上と
環境負荷低減の両立・
SDGsの達成

CO₂施用機「真呼吸」

収量・品質向上
灯油使用量削減



養液栽培

水の有効利用・土壌保全
減肥料



(株) 誠和ではLSスクリーン(ハウス内の内張りフィルム)による保温維持や、養液による栽培、灯油の使用量の削減などの研究が行われている。

1週間での変化をとらえての「短期的での解析」は、日々の設定変更などに活かされます。

また、週単位や月単位での「中期的な解析」は植物の変化をとらえるために、年単位での「長期的な解析」は作物全体や収量の変化を確認するために行います。

施設園芸におけるスマート農業の実例

ここでは、(株) 誠和の実例を紹介します。同社では「みどりの食料シス



制御装置



LEDライト



ハウス内環境測定装置



暖房機

テム戦略」*に合わせて環境にやさしい農業作りを目指し、保温の工夫や、肥料および水を削減する方策、光合成に必要なCO₂の効率的な発生方法を模索しながら、ハウス内で作物を栽培しています(図7)。

栃木県の2つのハウス(約8000m²と約1万m²)と徳島県の1つのハウス(約1万m²)では、制御機器に人が数値を入力し、コンピュータによって高度な環境制御が行われています。光合成のためのLEDライトや巨大な暖房機などが環境制御装置として設置されており、コンピュータのコントロールによって稼動しています。コンピュータがコントロールするために必要となる風向・風速や温度、湿度、培地や葉の表面の温度、日射量などのデータは、ハウスの内外に設置された複数のセンサーから得ています。

こうした大規模なハウスばかりではなく、さまざま現場の施設園芸にもスマート農業は導入されています。ハウス内の状況をデータとして見える化し、それをクラウド上に上げてグラフ化したり、収量予想を行ったりしています。また、現場に行かずにスマートフォンでハウス内の状況を確認したりすることも可能となっています。

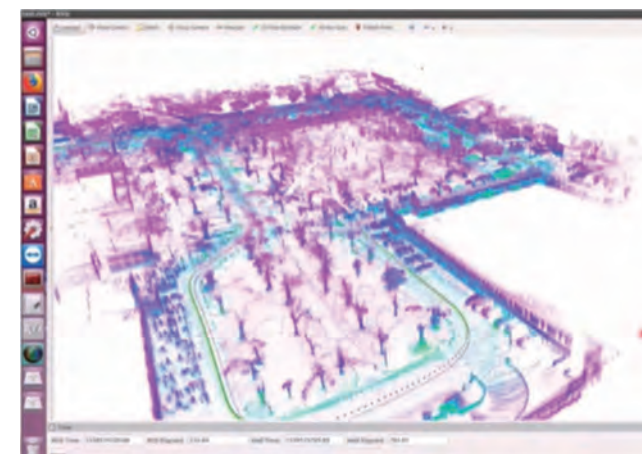
*みどりの食料システム戦略：環境を重視する国内外の動きが加速していく中で、これらに対応しつつ日本の食料・農林水産業において持続可能な食料システムを構築することを目的として策定された。食料・農林水産業の生産力の向上と持続性の両立を、技術革新で実現するとしている。

図1 自動運転技術とは？



LiDARやGPS等のセンサによって、対象となる環境の高精度3次元地図を作成
=地図作成
 事前に作成された高精度地図の「どこに自分がいるか」をあきらかにすることで、
 目的地まで到達=**自己位置同定**
地図作成+自己位置同定を同時に行う手法をSLAMといい、自動運転の重要キーワード

図2 高精度な3次元地図



LiDARによる情報とGNSS (GPS) などのセンサによる情報を融合させた高精度な3次元地図。自動運転では、このような「地図作成」と「自己位置同定」を同時に行うSLAMという手法が重要となる。

スマート農業では、ロボットトラクターをはじめとする完全自律型のロボット農機の開発が進められており、将来的には、AI (人工知能) 機能を持った、より小型化されたロボット農機の実現が目標とされています。ここでは、そうした小型スマートロボットの研究開発の現状や用いられる技術、そして農林業における貢献などについて、北海道大学工学研究院機械・宇宙工学部門の研究室で研究開発されている事例をベースに紹介します。

同研究室では、ロボット技術 (RT)、情報技術 (IT)、そして人工知能 (AI) を核として、「積雪環境における自動運転技術開発」「UAV (ドローン) の応用」「除草作業自動化技術の開発」の3つのテーマで研究を進めています。

自動運転技術とは？ —— 積雪環境下での自動運転技術の開発

自動運転に必要な技術

自律走行型の小型ロボットの自動運転技術とはどのようなものなのでしょうか。自動運転ではまず人が運転して、近赤外光や可視光、紫外線などを照射して距離を測定する「^{ライダー}LiDAR」などのセンサを用いて3次元地図が作られます。そしてGNSS (GPS) 等の情報と融合させることでさらに高精度な3次元地図が完成します。また、自分が今どこにいるのかを知る (これを自己位置同定と言います) ことも重要です (図1、図2)。

北大の研究室では、無人自動車を使った積雪地帯での実証実験を2017年から2020年にかけて行っています。実験では自動運転に成功しましたが、実験道路に特化したものであり、まだ実用化の段階ではありません。

雪道での自動運転技術と社会的な課題

高齢化・人手不足は現在の農林業の解決すべき課題ですが、これと同様に、北海道のような積雪地帯では「除雪に携わる作業員の高齢化・人手不足」が社会問題の1つになっています。特に小型の除雪機が歩道の除雪を行う場合は安全確認のために誘導員が必要になりますが、極寒の中、10～20kmという長距離を長い時間にわたって徒歩で移動しなければなら

ず、非常に過酷な作業となっています。

また、「積雪・降雪環境下における物流問題」という課題もあります。小型の配送ロボットなどで物資や郵便物が届けられていますが、積雪環境下での対応はまだ進んでいません。

いかにして人を検知するか？

こうした社会的な問題を踏まえた上での技術的な課題の1つとして、北大の研究室では「歩道除雪機の高機能化」をあげています。これは、誘導員の作業をセンサが代わりに行うシステムで、そのための「ロバスト^{※1}人検出システム」の開発が推進されています(図3、図4)。

自己位置同定を行い、人や障害物をどのような環境でも安定して検知して回避するこうした研究^{※2}は、農林業における小型ロボットの開発に大きく貢献します。研究では、実験のほかに仮想空間でのシミュレーションという手法も用いられています。

UAV(ドローン)の農林業への活用

ドローンによるインフラ点検

UAV(無人航空機)つまり「ドローン」は、農林業における小型スマートロボットの中核を担っているといえます。北大の研究室では、ドローンとリモートセンシング技術を使って港湾の防波堤などのインフラを点検する技術開発を進めています。

この研究では、防波堤のテトラポッド(消波ブロック)の欠損箇所を点検して定量的に評価する作業でのドローン利用を目指しています。ドローンに搭載したLiDARが防波堤を3次元の点群(点の集まり)として把握し、防波堤の設計図と比較することで、欠損の状況を数値で評価します。防波堤の点検を人が行くとすると、ボートで沖まで行って時間をかけて作業をしなければなりませんが、ドローンなら15分ほどで一気に行うことができるとされています。

※1: ロバストとは、「屈強な・堅牢な・頑強な」を意味する英語の「robust」で、ここでは、「どのような環境であっても、高い精度・安定性を維持して人検知ができる堅牢なシステム」というような意味合い。

※2: 基礎編「安全センサ」、応用編「遠隔監視ロボット農機」も参照。

図3 ロバスト人検出システムの開発

歩道除雪機の誘導員を代替する
アラートシステムの提案



暗闇や降雪、逆光などの悪環境において、AIと組み合わせたサーモカメラで人を検知、またLiDARで距離を測定してアラートを発出する。北大の研究室では小型除雪機の自動運転技術として開発されているが、将来の小型ロボット農機の安全性にとっても不可欠な技術といえる。

図4 アラートシステムの動作例



□: 15m~ □: 10~15m □: ~10m

DANGER! : 3フレーム以上連続して歩行者が10m以内にいる時に表示

吹雪の中で見えなくなるホワイトアウトの状態でも、サーモカメラで人を検知し、10m以内に近づくとアラートを発出する。

スペクトルカメラによるリモートセンシング

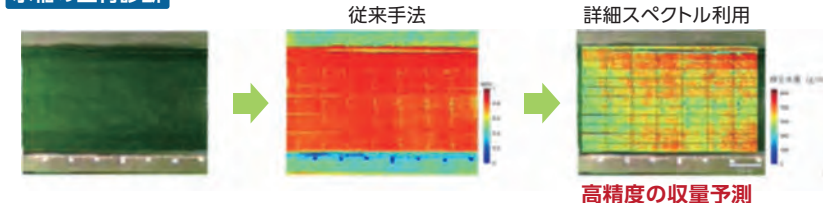
ドローンとリモートセンシング技術を用いると、広大なプランテーション農園で作物の生育や病害虫の発生状況などを短時間で調べることもできます。そうした農林業において用いられるのが「スペクトルカメラ」です。スペクトルカメラは光の波長の分解能が非常に高く、一般のカラー撮影では得られないスペクトルの微妙な形状から有用な詳細情報を得ることができます(図5)。

スペクトル情報と位置情報を紐づける

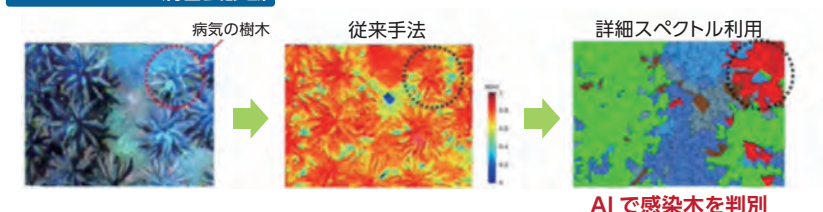
こうした「スペクトル情報」に「位置情報」を加えることで実用性がさらに高まります。例えばバナナ農園などで新パナマ病が発生した場合、スペクトルカメラを搭載したドローンを使って、感染したバナナの木やその位置が突き止められれば、伐採や薬剤散布などの対策を早急に立てることができます。つまり、スペクトル情報と位置情報を紐づけて活用することが重要なのです(図6)。

図5 従来の技術とスペクトルカメラとの違い

水稻の生育診断

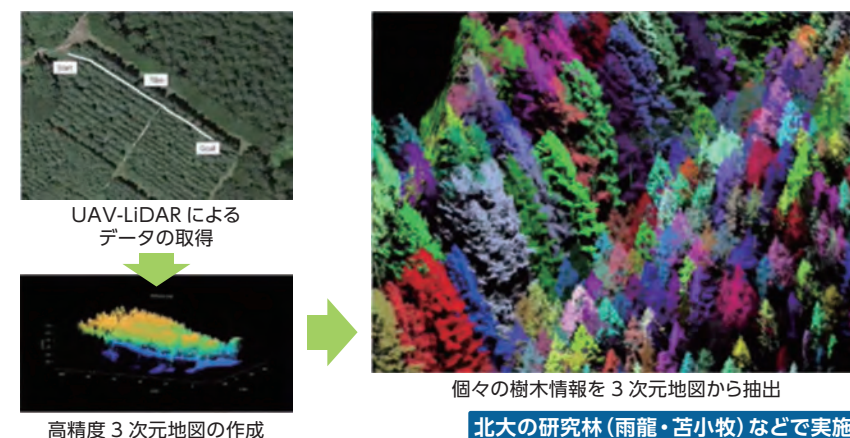


オイルパームの病害虫診断



スペクトルカメラを利用すると水稻の生育状態がわかり、収量予想も立てやすくなる。また病気になったパームツリーも、AIと組み合わせることで、感染した木を正確に識別できるようになる。

図6 森林資源管理を目的として、UAV (ドローン)+LiDARによる計測を実施



ドローンに搭載した3D-LiDAR (3次元ライダー)で対象となる森林を計測し、そのデータをもとに高精度3次元地図を作成。その3次元情報から個々の樹木の情報を取り出す。

除草作業の自動化

雑草と作物を見分ける

例えば漢方薬の薬草の栽培では除草剤の使用が制限されており、現場では人が手作業で雑草を除去しているのが現状です。また、近年SDGsがさげばれて「環境負荷の低減」が求められていることから、農業においては減農薬の動きが加速しています。

スマート農業では「ピンポイント防除技術」の導入が進められています。同時に、人に代わって自律走行する小型ロボットがマニピュレータなどで機械的に雑草を除去する技術の研究開発が進められています。

畝と畝の間の雑草を取り除くロボットはすでに開発されていますが、1つの畝にある作物同士の株間に生えている雑草を除去できる汎用性のある小型ロボット農機のニーズが世界的に高まっているのです。トラクターの

図7 雑草と作物を高精度で識別するロバスト深層学習



車両速度は時速1km(写真左)。この速度で移動しつつ、80%の精度でハトムギと雑草を識別した(写真右)。精度を90%にまで上げ、1秒間に10回識別できれば、十分に実用的になると考えられている。

ような大型ロボット農機よりも自律走行可能な小型ロボットの方が、畝の株間にある雑草を高精度に識別して細かく除去するのに最適と考えられています。

こうした除草用の小型ロボットの実用化には、作物と雑草を高精度で見わけるAIの開発が不可欠となります。北大の研究室では、1秒間に5～10回ほど作物と雑草を見分けられる、AIのための「ディープラーニング(深層学習)」の枠組みを開発して実証実験を行っています(図7)。

自律走行の速度と確実な除草機構

北大の研究では、小型ロボットがセンサで畝を認識しながら自律走行する場合の速度の目標を時速1～3kmとしています。また、雑草を識別するだけでなく、雑草を確実に根から除去できるマニピレータの開発も行っています(図8)。

シミュレータも利用することで効率よく開発

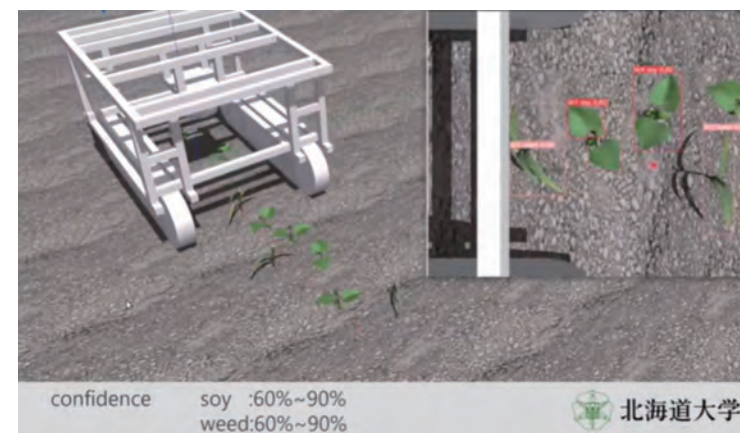
開発の現場では、実際に車両を走らせての実験だけでなく、仮想の3次元空間での車両の設計やマニピレータの取り付け、そして完成した車両の稼働に関するシミュレーションも行い(図9)、時間と労力を削減しながら除草用小型ロボットの開発を効率よく進めています。

図8 除草ロボットの最近の取り組み



搭載されているセンサカメラによって、畝沿いを時速1kmで走行するロボット(写真左)。マニピレータの実演では1回失敗したが、再度トライすることで雑草を除去した(写真右)。

図9 小型スマートロボットの実験の開発



仮想空間における除草作業のシミュレーション。使用されているハトムギや雑草、さらには土地のテクスチャー(表面の状態)は、実際の北大の圃場から得られたデータをもとに作成されている。このため、実際の実験を行ってもきちんと動き、短時間で効率的に実データを収集することが可能となる。

意外に多い農作業の事故

農業にはのどかなイメージがありますが、鎌などの器具による怪我や農業機械による事故など多くの危険が潜んでいます。

現在、農作業中に亡くなる人の数は減少傾向にありますが、農業者10万人当たりの発生件数を見ると、全体的に増えている傾向にあります(図1)。実は発生件数を見ると、農業は建設業の1.8倍、日本国内の全産業の平均と比べて8倍も死亡事故の発生確率が高いとされています。

事故の内訳を見ると、近年増加している「熱中症」が全体の1割近くを、そして「農業機械による事故」が7割を占めています(図2)。

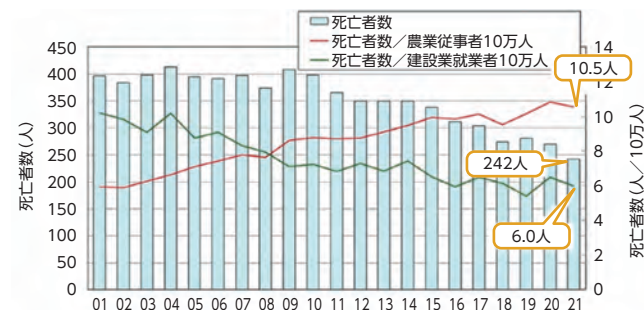
農業の事故が減らない原因

農業の中でも家族経営の農業は、原則として労働者の安全を守る「労働安全衛生関連法令」の適用外となっており、事故が発生しても報告の義務がありません。このため事故の詳細がわからずに、農作業事故を防ぐための具体的な対策が立てにくいという背景があります。

また、農業以外の産業では、法令や規則に基づいて労働安全コンサルタントなどの専門家の指導の下に安全対策が立てられる枠組みができています。ところが農業では、そうした動きの普及がなかったために安全対策が確立しにくくなっています。

「自分の身は自分で守る」といっても、具体的にどうすればいいのかわからず、結局は「今まで事故もなくやってこられたんだから、注意すればこれからも大丈夫」と自分勝手に判断しがちですが、注意力は15分程度しか続かないとも言われています。そもそも人はミスをする生き物であり、ただ注意するだけでは事故を防ぐことは難しいのです。

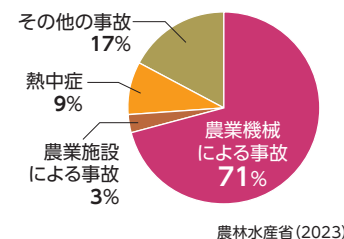
図1 農作業事故の件数



※農林水産省の農作業死亡事故調査報告、「農林センサス」、「農業構造動態調査」に基づき作成

水色の棒グラフは農作業における死亡者数。折れ線グラフは農業従事者と建設業就業者それぞれ10万人あたりの死亡者数で、危険なイメージがある建設業では減少傾向にあるのに対し、農業は増加傾向を示している。

図2 農作業死亡事故の内訳



農林水産省(2023)

図3 事故を防ぐためには

事故の要因の種類

機械や器具に関わること
事故現場の環境に関わること
人に関わること
安全管理に関わること

これまで「人のミス」として扱われていたものも、実はそれ以外の要因が強く関係している場合がたくさんある!

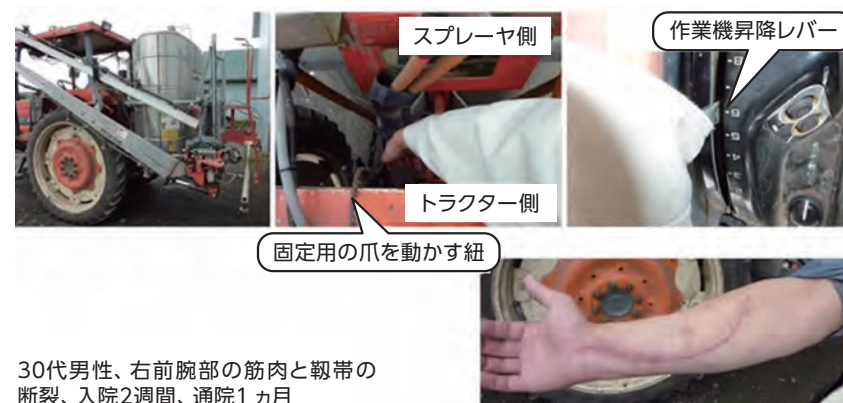
農業における事故について

事故の要因には何があるか?

事故の要因には、大きく分けて4つの種類があります。作業中に使う「機械・器具」、事故が起こる現場である「環境」、そして「人」、さらに、安全のためのルール作りを適切に行う「安全管理」です(図3)。

ただし、それぞれの要因には関連性があり、人のミスとして扱われた事故が、それ以外の要因と強く関係している可能性もあります。例えば、「機械を動かしたままゴミを取ろうとして怪我をした」という場合、「危険で

図4 作業機脱着時の事故事例(1)



30代男性、右前腕部の筋肉と靱帯の断裂、入院2週間、通院1ヵ月

図5 作業機脱着時の事故事例(2)

機械に関する要因

- ・昇降レバーの球状の握りが取れて、袖が引っかかりやすい状態だった
- ・紐で固定爪を動かす方式であり、紐の取り扱いが煩雑だった

安全管理上の要因

- ・関係機関が作業機脱着時にエンジンを止めることや、修理の重要性について啓発していなかった

環境に関する要因

- ・特になし



昇降レバーの先端には球状の握りが付いていたが、これが取れた状態で放置されていたため、袖口が引っかかりやすくなっていた。この点は「機械による要因」だが、壊れたところは修理しておくことが定着しておらず、この点からは「安全管理上の要因」の事故とも言える。

ただし、安全センサをオフにすることができる機種もあり、その場合は監視する人が目を離したすきに人がロボット農機に近づいても、とっさに停止操作をすることができません。つまり、ロボット農機のまわりにも事故の芽はあるとも言えます。

このため、今後のロボット農機はレベル3、つまり人が遠隔地から映像で監視し、異常が発生した時はAI（人工知能）やロボット自体が判断して

あることを誰からも教えてもらっていなかった」としたら、もっぱら本人のミスであったとはいえ、安全啓発活動が不十分でもあったわけで、安全管理が要因となって起こった事故といえます。

事故の実例——作業機の脱着時の事故

事故の実例を見てみましょう。

農業散布などに使われる作業機であるブームスプレーヤをトラクターから外すとき、スプレーヤが突然持ち上がったためにトラクターとスプレーヤの間に腕を挟まれました。その結果、右前腕部の筋肉と靱帯が断裂。2週間の入院のあとにリハビリのため1か月の通院を余儀なくされました。なかなか握力が戻らない後遺症も残ってしまったといえます。

この事故は、スプレーヤの固定用の爪を動かすための紐がトラクターとスプレーヤの間に落ちたため、後ろを向いて右手で拾おうとしたところ、左腕の袖口が作業機の昇降レバーに引っかかり、作業機を上げてしまったことが原因で起こりました(図4)。

この事故の要因としては、まず「機械に関する要因」が挙げられます。次に「作業機の着脱時にはエンジンを切る」という重要な点が徹底されていなかったということで「安全管理上の要因」も挙げられます(図5)。

この事故の対策として、まず「機械」面では、固定爪を紐ではなくレバー式ないしは電動式にすれば、運転席から正面を向いてスプレーヤを外すことができます。また「安全管理」面では、作業機の着脱時にはエンジンを止めること、レバーなどの破損部分はすぐに修理することをJAなどの関係機関が農業従事者に周知させるなどが対策として挙げられます。

作業機の脱着時の負傷事故としては他に、作業機が急に外れたり、作業機とトラクターをつなぐユニバーサルジョイントのカバーが外れて足の上に落ちて骨折する、コネクタに指を挟まれるなどの例があります。

ロボット農機は事故を防げるか?

現在市販されているロボット農機は、近くで人が監視している状態で使われます(レベル2)。人の監視には限界があるので、ロボット農機には2D LiDARや近接センサなどの安全センサが搭載されています。

自動停止する方向で開発が進められています(応用編・第3節)。人間の負担を減らす反面、ロボット農機側の責任が増えることになりますが、人や障害物を完全に検知する技術は進化の途上にあると言えます。

事故を防ぐための3つのステップ

事故を防ぐには3つのステップがあります(図6)。ステップ1は、「作業現場の危険源を取り除く」です。とはいえ、すべての危険を取り除くことはできないので、ステップ2では「取り除けない危険源と人を隔てる」ようにします。そしてステップ1と2を実施したあとで、ステップ3として「安全な行動を遵守する」を行います。安全教育やマニュアルの作成を実施してグループ全体で共有することで、自分では気づけない点を他の人の意見で気づくことができます。また、安全対策を立てることばかり考えてステップ3から始めるのではなく、ステップ1と2を踏まえた上でステップ3に取りかかることが大切です。

具体的には、ステップ1は安全性の高い農業機械の選択です。たとえば農研機構の制度である「安全性検査」に合格した農機などで、ロボットでいえば無人運転モードでは必ず安全センサがオンになる安全性を備えています。ステップ2は、カバーを外したままにしない、破損したら修理をする、人の圃場への侵入を防ぐ警告看板や柵を設置するなどがあります。またステップ3は安全な作業の励行で、ロボット農機の自動走行中は補助作業者は圃場に入らない、ロボット農機が圃場から逸脱する時は停止させる、運転開始や停止の合図や方法を補助作業者と打ち合わせておくなどがあります。

「つい・うっかり・まあいいか」をなくすには?

こうした取り決めをしても、人は「つい・うっかり・まあいいか」と考えてしまいます。その場合は、考え方を考えてみましょう。

例えば機械を清掃する時、ついついエンジンを止めずに作業してしまいがちです。ところが、機械を止めるのにかかる時間が30秒や1分なら、止めたとして1日の作業にどれぐらい影響が出るでしょうか。怪我や命と引き換えに惜しむほどの時間でしょうか。それこそ怪我をして農作業にあ

図6 労働安全衛生管理の考え方

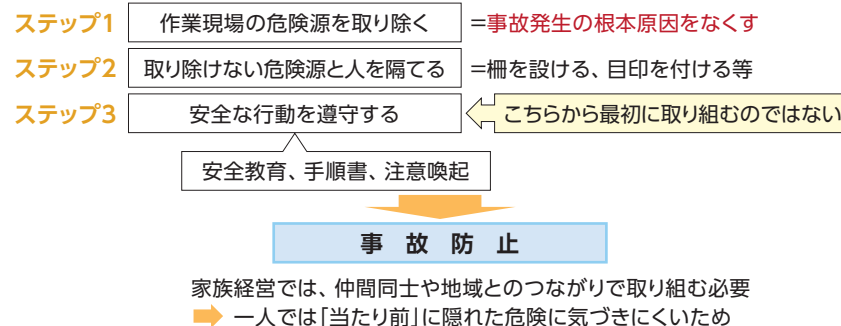


図7 危険に気づける自分になる「KYトレーニング」

- 各自が問診票に記入し、グループ内で発表し合う
- 各自が気づかなかったことを他のメンバーの意見で気づける
- 作業前のミーティングで実施する
- 想定される危険とその対応策を頭に入れて作業にのぞめる
- とっさの時でも適切な行動が取れるようになる

記入例(耕耘作業)

作業名	危険な場面は?	私たちはこうする
ロータリの着脱	手が挟まれる	ロータリが動かないように平らなコンクリート上で行う
路上走行	右折時の後継車の追突	ミラーだけでなく、直接、後方を目視確認する
圃場内の旋回・位置合わせ	急旋回時の転倒	速度を下げた旋回する

たれなくなった時の経営的損失は……。このように考えることで、「ルールだから従う」のではなく「理解して実践する」ことができるようになるのです。

他産業でも行っている安全対策の実例

KYトレーニング(KYT)

「危険予知トレーニング」とも言います。グループの各人に用紙を配り、ある作業について考えられる「危険な場面」と、それを防ぐために「自分ならこうする」という意見を書いてもらいます。そしてそれを発表し合うことで、自分が気づかなかった危険や対策に気づくことができるようになります(図7)。

5S

5SのSは「整理・整頓・清掃・清潔・^{しつけ}躰」の頭文字です。必要なものといらないものを分けて、いらないものを捨てる「整理」、必要なものをすぐ取り出せるように置き場所や置き方を決める「整頓」、きれいにしながら異常に気づく「清掃」、きれいな状態を維持して異常を発見しやすくする「清潔」、そして、決められたことを実行できるように慣習づけるための「躰」です。

5Sは労働安全だけでなく、「収益向上の一丁目一番地」と言われており、他産業でも重視されています。中でも、「整理・整頓」が一番大切とされています(図8)。

農業における安全とは、まず機械や環境、安全管理に潜む危険に気づき、KYトレーニングやミーティングの場でグループで共有します。そして5Sなどに基づいて作業現場を改善してルールを作ります。最初からうまくはいきませんが、発見した不具合やヒヤッとした経験(ヒヤリハット)をもとにして改善する流れを繰り返すことが重要です。欲張ると長続きしないので、手をつけやすいところから始めましょう(図9)。

図8 整理・整頓は特に重要!

何枚ずつだか、
わかりますか?



何枚ずつだか、
わかりますか?



参考: 宮城学院女子大・大橋 2016

整理・整頓によって、無駄なくミスなく余裕をもって判断や行動することが可能となり、ミスを減らすことができる。

図9 農作業安全の考え方(まとめ)

1. まず、事故の実態を知り、「自分ごと」としてとらえる

2. できることを考え、実践する

・ 機械、環境、安全管理に潜む危険に気づき、全員で共有

・ 現場を改善する、作業のルールを作る

5S

・ ルールを理解し、実践してみる

・ 不具合のある点やその後に起こったヒヤリハットを元に改善し、再度やってみる

KYT、農場
ミーティング

これを営農が続く限り繰り返す(「適正農業規範」と同じ考え方)
重要なところ、手をつけやすいところから徐々に広げる。

機械導入による経営評価

スマート農業にはロボットトラクターや自動水管理システムなど、さまざまな装備や技術が用いられ、経営者は新しい機械を導入することになります。ここでは農業経営評価に役立てるため、機械導入の前と後の農業経営がどう変わるかを、「利益」という数字で示す方法を紹介します。

前半では基礎として「費用対効果」という視点からスマート農業機器のとらえ方を説明します。そして後半では具体的な分析方法を取り上げます。

なお、データや資料はスマート農業の実証事業で得られたものを用いています。

スマート機械導入による費用対効果

効果を「時間」と「重量」で見える

費用対効果を考える上で、まず「効果」に注目し、その効果を「時間」ベースで見えてみましょう。例として、自動運転トラクターと直進アシスト田植機をセットで導入した実証事業をあげます。

図1は、機械を導入したことで「10a当たりの労働時間がどれくらい変化するか」を示していて、データが45度線よりも下なら労働時間が短くなったことを表しています。

新しい機械の導入による効果を考える時は、時間の面の省力化だけでなく「重量」、つまり収量も大切です。可変施肥技術の導入前後で単収がどう変わったかを表したのが図2で、45度線よりも上にデータが来れば収量がアップしたことになります。

スマート農業を導入することの魅力(効果)を「数字」で確認することができるでしょう。

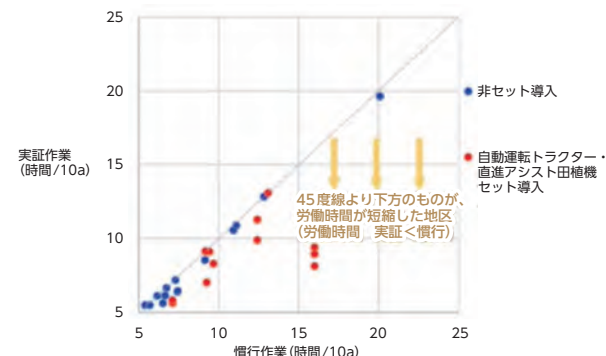
費用対効果 — 効果を得るためにどれほどの「費用」がかかったか？

次に、こうした効果を得るためにどれだけ費用がかかるかが重要なポイ

図1 効果：技術の特性評価 例1「時間ベース」

水田作経営の例：

自動運転トラクター + 直進アシスト田植機
→作業効率向上効果



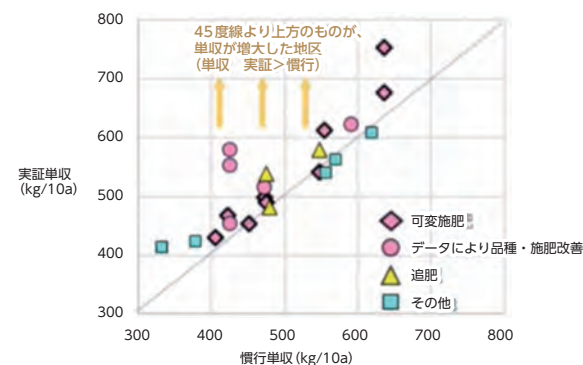
出典：農林水産技術会議事務局・農研機構「令和元年度スマート農業実証プロジェクトの成果について(水田作)」2022年8月

時間ベースで見ると、自動運転トラクターと直進アシスト田植機の導入は、作業効率を大きく向上させたといえる。

図2 効果：技術の特性評価 例2「重量ベース」

水田作経営の例：

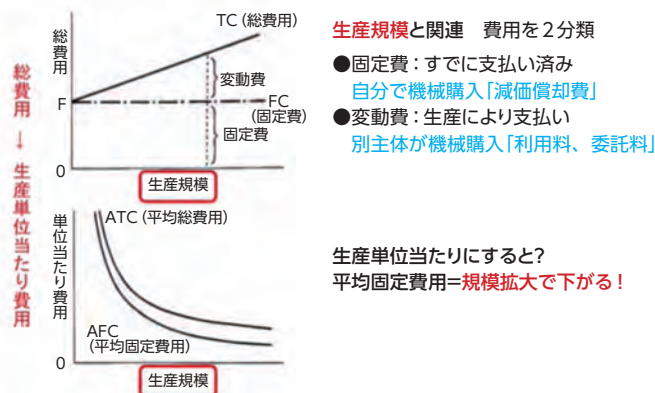
可変施肥技術 →増収効果



出典：農林水産技術会議事務局・農研機構「令和元年度スマート農業実証プロジェクトの成果について(水田作)」2022年8月

ピンクであらわしたものがスマート技術を導入したケースの結果。45度線よりもかなり上に来ているものが多く、収量の増加があったことを表している。

図3 費用：機械（ハードウェア）導入の捉え方



上のグラフ：「固定費」は自分で機械を買ったなど支払い済みの費用で、具体的には「減価償却費」として上乗せされる。「変動費」は誰かが買った機械を使わせてもらう場合の利用料や委託料などで、機械をどういうふうにするかによって変動する。
下のグラフ：規模を拡大することで「平均固定費」が下がることを経済学では「規模の経済」といい、固定費が大きいビジネスでは、規模が大きいほど「規模の経済」がはたらく。

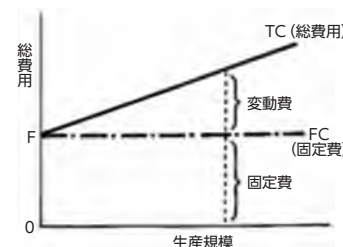
ントです。ここでは、機械導入の際の費用の捉え方の1つとして「コスト曲線分析」を紹介します。

図3の上のグラフの縦軸は「総費用」、横軸は「生産規模」です。費用は「固定費」と「変動費」に分けて考えます。たとえば、自分で機械を購入して支払った分は固定費に入ります。具体的には、減価償却費は機械の場合は7年と決まっているので、取得価額を7で割った金額が減価償却費として毎年の負担に上乗せされます。一方、他の誰かの機械を借りて使う場合には自分の使い方に応じて費用が変わり、これは変動費となります。つまり、実際に機械をどう使うかによって費用のかかり方が違ってきます。

次に、図3下のグラフは縦軸が生産単位当たりの費用です。こちらは主に固定費に関わり、生産規模が大きくなるほど生産単位当たりの費用が下がっていくのがわかります。

実際には今まで使っていた機械をスマート農業の機械に買い換えることが多く、その場合は両者の差額を見ることになります。共同所有で購入

図4 農業機械の所有

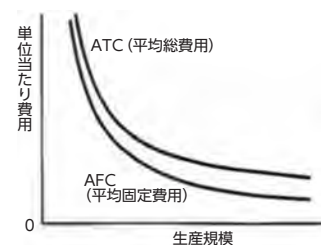


年当たり費用：
減価償却費（取得価額÷法定耐用年数7年）＋修繕費

- 固定費 増加
個別所有で新規導入：全額↑
個別所有で買い換え：差額↑
共同所有なら分割↓
※農林水産省による財政支援あるも、なお高額
- 変動費 増加
機械借入：利用料金↑
作業委託：委託料金↑
既存機械を処分できると↓
※共同所有・委託
▲自由度が低い→「効果」を得られる？
▲料金体系が不確定
▲調整がたいへん！

費用だけを見ると共同所有や委託は優れているが、「好きな時に使いたい」という自由度は低くなる。所有するのと借りるのとどちらが長期的に見て得か、また機械の所有者は利用者の調整の負担を負うなどの留意点がある。

図5 農作業の季節性



- 農繁期の省略化のみ規模拡大に直結
農繁期：適期作業可能な面積拡大
→生産規模拡大 →平均総費用は下がる
天候不順の年次 作業適期が短い
＝短時間で作業しないと収量・品質低下
生産拡大により[平均総費用低下]するが…
天候不順時の[収入低下リスク]を考慮 “余力”

その年に限って天候不順で、短期間に作業をしなければならない時もある。生産拡大によってコストを抑えるという考え方は大事だが、天候不順の時などの対応力など“経営の余力”を考えて装備と規模のバランスを取ることも重要。

する場合には分割しての負担となり、また、新たに機械を借りる場合には固定費が下がって変動費が新たにかかるというふうになり、所有と利用のパターンによって費用の上乗せの形は異なることに注意しましょう。

なお、実際には共同所有をめぐっての留意点(図4)や、農業の季節性にかかわる留意点(図5)なども踏まえておく必要があります。

作業の季節性

図6は、水稻の作業時間を月別にあらわしたものです。たとえば農繁期である5月に直進アシスト田植機を導入すると、所有者は固定費を払うことになりますが、規模拡大の実現で平均固定費用が下がるかもしれませんし、固定費である常雇の人件費や、変動費であるこの時期のみの臨時雇用を減らせるかもしれません。一方、農閑期の6～8月に自動水管理システムを導入しても、もともと余剰時間があるので規模拡大にはつながらず、固定費のアップが経営に直接のしかかってくることになります。

金額ベースで利益を示す分析方法

「大きな効果」と「抑えた費用」のデータが出てきた場合、どう分析すればいいのでしょうか。効果は「時間」や「重量」で出てくることが多いですが、費用は「金額」で出ます。そこで、金額ベースで利益を表す「収支分析」と「シミュレーションによる農業経営モデル分析」を紹介します。

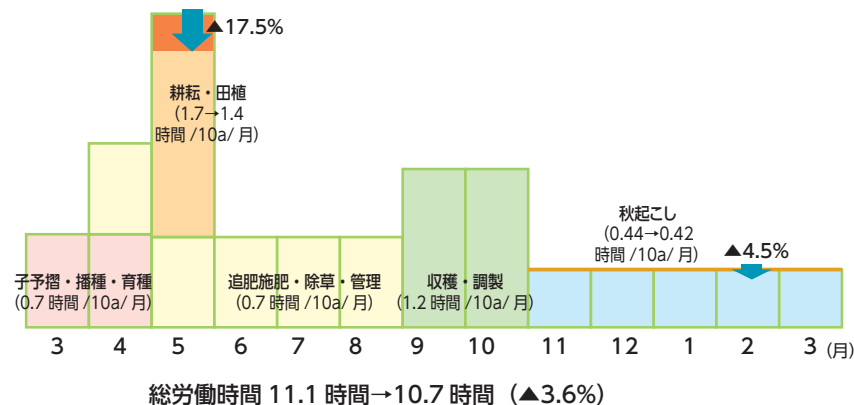
収支分析

スマート農業は、機械だけ交換して他は同じという事例は、ほぼないと考えられます。実証事業でも、「機械体系」だけでなく農地面積や労働力などの「経営資源」、作付品種や作付比率などの「作付体系」、施肥量や資材銘柄の変更などの「栽培技術」が変化します。

「収支分析」は、機械導入も含めたこれら全ての変化を反映したうえで決算データとして数字を出す方法です。「スマート農業をやったらどうなるか」を明らかにすることが目的である場合は、何をどこまで計上するかは、その目的に合わせて調整します。

実際には、収入と、変化の支出を単純に引き算して出てくるのが利益なので計算自体は簡単で、導入前と導入後での利益の増減がはっきり数字で表されます。

図6 実証結果：月別水稻作業時間の削減例



【農繁期】5月

●直進アシスト田植機

固定費↑

規模↑：平均固定費用↓

常雇↓：固定費↓

臨時雇↓：変動費↓

【農閑期】6～8月 管理作業

●自動水管理システム

固定費↑

→これまで以上に余剰時間が増える

水稻収量アップ
園芸作物など栽培
作業受託 など

出典：農林水産技術会議事務局・農研機構「令和元年度スマート農業実証プロジェクトの成果について(水田作)」2022年8月

農繁期の機械装備の変化は、いろいろな意味で費用に影響をあたえる。農閑期でのシステム活用は、優秀な管理システムなら収量アップになったり、他の作物を栽培したり、受託で稼いだりといった選択肢があるものの、総じて費用を抑えにくいと言える。

収支分析の2つの例

図7は、水田作経営の事例です。最終的には10a当たりの利益が3万8400円から5500円に大幅に下がった結果になっています。ところが、導入機械の稼働面積を機械のスペックに合わせて53haまでフル稼働すれば、十分な利益が出るという結果となりました。

もう1つの例(図8)を見ると、規模拡大によって経費が上がるものと下がるものが相殺され、利益は6287万円から5146万円に下がっています。

図7 現状評価：収支分析の例 水田作経営の事例1

経営概要(令和2年度)			
・労働力構成： 家族3名 常時雇用1名、臨時雇用2名			
・経営面積： 65.2ha うち主食用水稲38.6ha 新規需要米26.6ha			
・実証面積： 5.1ha			
実証内容(目標)			
・自動運転トラクター (耕耘・代かき時間 20%減)			
・自動運転田植機 (作業時間 30%減)			
・収量コンバイン (単収・粗収益 10%増)			
・営農管理システム			

区分	慣行区 (6.7ha)	実証区 (5.1ha)	備考
収入	117.8	129.3	※
販売収入	117.8	129.3	販売単価はいずれも250円/kg
(単収)	(471kg)	(517kg)	施肥設計の見直しにより単収増大
その他収入	0	0	
経費	79.4	123.8 (81.3)	
種苗費	2.1	2.1	
肥料費	9.7	9.2	施肥設計の見直しにより施肥量を低減
農業費	2.8	2.8	
機械・施設費	13.7	59.2 (16.7)	導入機械の稼働可能面積(53ha)での試算値
労働費	16.7	16.1	労賃単価1500円/時間で計算
(労働時間 (時間/10a))	(111時間)	(10.7時間)	代かき、田植作業において18%省力化
その他費用	34.4	34.4	
利益	38.4	5.5 (48.0)	※

※上表は「コシヒカリ」での収支を計算。実際に導入機器の稼働可能面積までスマート農機を使用する場合には、業務用品種や新規需要米(飼料米等)を組み入れるため経営全体の収入・利益は、これよりも低位。

面積あたり収支 慣行>実証 利益↓(導入機械の稼働面積を拡大すれば利益↑)

出典：農林水産技術会議事務局・農研機構「令和元年度スマート農業実証プロジェクトの成果について(水田作)」2022年8月

家族経営で家族3名。そこに常雇が1名。臨時雇用2名で規模は65.2haと、家族経営の中ではかなり大規模経営。ラインナップとしては自動運転トラクターや田植機、収量コンバイン、営農管理システムが入っていて、それなりのフル装備。結果的に、機械の所有と利用次第で十分利益が出るとみられる。

図8 現状評価：収支分析の例 水田作経営の事例2

経営概要(令和2年度)			
・労働力構成： 家族5名 常時雇用8名			
・経営面積： 水稲46.0ha、大豆50.6ha、 大麦10.3ha、枝豆8.1ha、 その他1.3ha			
・実証面積： 水稲27ha、大豆40ha、枝豆5ha 計116ha			
実証内容(目標)			
・自動運転トラクター+自動操舵システム(耕耘・整地)、ドローン(防除)、自動水管理システム、自動運転コンバイン			
→(水稲における労働時間を24%削減)			
・自動運転トラクター+自動操舵システム(耕耘・整地)、ドローン(防除)			
→(大豆における労働時間を35%削減)			
・車道連動ブロードキャスト(肥料散布)、自動操舵システム(耕耘同時散水マルチ播種)			
→(枝豆面積を約50%拡大)			

区分	慣行(実証前) (平成30年度)	令和2年度	備考
収入	139,963	163,910	
販売収入	115,077	152,284	
水稲	36,739	53,396	面積：32ha→46ha
大豆	43,759	60,636	面積：41ha→51ha、交付金等を含む
枝豆	8,391	12,251	面積：3ha→8ha
その他	26,188	26,001	
その他収入	24,886	11,626	
経費	77,090	112,448	
種苗費	2,969	4,207	
肥料費	5,387	9,507	
農業費	3,709	10,163	
機械・施設費	8,112	19,562	
労働費	18,644	15,166	
(労働時間 (時間))	(12,430)	(10,111)	うち水稲：6,500時間→3,600時間 大豆：3,300時間→2,700時間 枝豆：2,100時間→3,100時間
その他費用	38,268	53,842	
利益	62,873	51,462	

面積あたり収支 前>後 利益↓(面積拡大するも労働時間削減 時間あたり利益同等)

出典：農林水産技術会議事務局・農研機構「令和元年度スマート農業実証プロジェクトの成果について(水田作)」2022年8月

家族労働力5名、常雇8名、経営面積は米・大豆・大麦・枝豆その他を作付する116haの規模。収入は最終的に減っているが、面積拡大しているにもかかわらず労働時間が削減された。

その代わり、総労働時間は短くなるという結果になり、この削減時間をどう使うかが、ポイントになります。

シミュレーション分析

線形計画法という方法で、さまざまな要素を数式であらわし、それをツール^{※1}にインプットすることで計算します。費用対効果に優れた理想的な経営とはどのようなものかなどをモデルとして示すことができます。

シミュレーション分析は、面積に制約をかけたたり、天候条件に基づいて日数に制約をかけたたりなどの設定をすることで、あらゆる状況を想定した結果を出すことができます。また、例えば可変施肥についても、収量アップを5%、10%と具体的な数字で条件を設定してシミュレーションできます。

シミュレーション分析の2つの例^{※2}

まず、「水田作の大規模モデル」を見てみましょう(図9)。平場で圃場条件が良く、規模も100haの大規模雇用型法人を想定しています。導入する機械は自動運転田植機から営農管理ソフトまでスマート農業のフル装備を設定しています。所得目標が1人当たり1000万円を超える経営をシミュレートした結果、面積当たり時間は40%減、加えて、非熟練者でも作業しやすい機械を導入したことで、雇用労働力を確保しやすくなり、大規模化を実現しています。高性能機械により固定費はかなり上がりますが、収量が15%アップすることで、米重量当たりのコストは逆に下がるという意欲的なモデルで、「スマート農業の理想的な経営のやり方」が提示されています。

その他のモデル例として、図10は、平場で圃場条件がよい場合で、家族経営の15haモデルを示しています。ロボットトラクターは利用せず、後付け自動操舵システムを活用しています。収量コンバインは「3戸利用共同」しており、規模に見合った装備を選択しています。ここでも、固定費は上がりますが、収量が15%アップすることによって、むしろ米重量

※1：一例として、インターネットで「農研機構 XLP」で検索すると、Excelで計算するツールが無料配布されているサイトがある。じっくり解説資料を読んで方法を理解すれば、だれでも最終的な最適な計算結果を得られる。

※2：農林水産省「食料・農業・農村基本計画」に付随する参考資料「農業経営の展望」の2020年版より。

図9 水田作(平場・規模拡大)農業経営モデル

- 平場 100ha 雇用型法人
- 面積当たり時間 40%削減、非熟練人員規模拡大
- 収量 15%アップ、米 60kgコスト 15%削減
- 一人当たり所得 1024万円



出典:農林水産省「農業経営の展望」(食料・農業・農村基本計画参考資料。2020年3月31日閣議決定)

自動運転田植機や高速の播種機、防除のドローン、自動水管理システム、営農管理ソフトウェア自動収量コンバインとフル装備となっている。

あたりのコストは下がっています。

収支分析は機械導入の前と後での利益の増減が見られるのでとてもシンプルですが、いろいろな収支分析の結果資料からすると、スマート農機は導入直後から利益が大幅にアップということは難しそうです。機械の所有方法や、余った時間をどう使うかなどの工夫が必要でしょう。

効果や費用、実績について、あらゆるデータを取り込んで計算してモデルを提示するシミュレーション分析も活用して、現在の経営評価をしてみましょう。

図10 水田作(平場)農業経営モデル

- 平場 15ha 家族経営
- 機械3戸共同 費用抑制
- 収量 15%アップ、米 60kgコスト 15%削減
- 一人当たり所得 630万円



出典:農林水産省「農業経営の展望」(食料・農業・農村基本計画参考資料。2020年3月31日閣議決定)

装備はフルではない。また、個人で買うのではなく3戸共同という形となっているモデル。

施肥に関するさまざまな課題

作物の生育には十分な養分が必要なため、作物に必要な養分が土壌から得られない時には生産者は「施肥」をしなければなりません。

しかし、施肥が過剰に行われたり、農地の場所ごとに土壌養分の濃度が異なるのに一律に施肥が行われたり、生育の悪い作物に追肥をする機会が失われたりするなど、施肥に関する解決すべき課題が指摘されています。社会情勢の影響で化学肥料が高騰している点も見逃せません。

過剰な施肥は周辺に流出して環境汚染の原因となり、社会全体の目標である「持続可能性」の面で問題となっています。それだけでなく、過剰な施肥によって土壌が劣化したり、作物自体の生育が逆に悪くなったりすることで作物の収量・品質の低下を招き、結果的に農業の生産性も低下します(図1)。

こうした背景から、わが国が策定した「みどりの食料システム戦略」(200ページ参照)では、持続可能性を達成しながら生産性の高い農業の実現を目指し、化学肥料の使用量を2050年までに30%低減させる目標を立てています。

現在の土壌分析方法

施肥は「土壌の状態に基づいて、ちょうどよい時に、ちょうどよい量」で実施することが大切です。その技術として「可変施肥技術」があり(138ページ参照)、それにはまず土壌養分の状態を正しく知る必要があります。

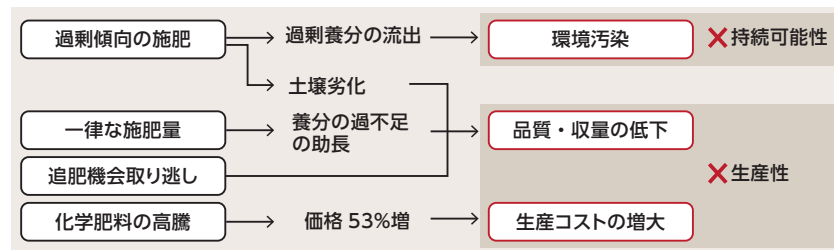
その方法としては「土壌分析による方法」と「ドローンや衛星によるセンシングデータを用いる方法」の2つがあり、それぞれメリットとデメリットがあります(図2)。

この土壌分析の方法は2つあります。1つは業者に土壌分析を委託する「一般土壌診断」で、現在よく利用されている方法です。そしてもう1つが、生産者自身が簡易的なキットで分析する方法で、これら2つにもメリットとデメリットがあります(図3)。

こうした土壌診断の結果をより有効に活用して施肥に活かすには、以下の点が求められます。

図1 わが国の農業の課題

施肥におけるさまざまな問題



みどりの食料システム戦略の策定

化学肥料の使用量を2050年までに30%低減する目標を設定

- ・持続的農業の実現
- ・生産性向上

解決すべき課題

土壌状態に基づく適時・適正量の施肥の実現

「過剰傾向の施肥」や「化学肥料の高騰」などが要因となって、環境汚染や生産コストの増大といった問題が生じる。

図2 土壌の養分を分析する方法

方法	メリット	デメリット
土壌分析による方法	・土壌の状態(養分量など:土壌化学性を直接把握できる) ・土壌成分の各種を分析することができる	土壌の分析に手間と時間がかかる(栽培途中で肥料を追加する機会を失いがち)
ドローンや衛星によるセンシングデータを用いる方法	・一度に大規模なデータを得ることができる ・作物の生育の状況を把握することができる	生育に関わる窒素量の推定しかできない

図3 土壌診断の種類

一般土壌診断(委託)

- 多くの分析項目をカバーできる
- ▲ 分析費用が高い
- ▲ 結果を得るまで時間がかかる

簡易キット

- 生産者自身で分析可能
- 結果をその場で得ることができる
- ▲ 精度や価格、操作性に改良が必要

多く利用されている



検査機関



- ・即時に分析結果を取得できること
 - ・低コストで、分析の手間や負担が軽いこと
 - ・データ管理が簡単にできること
 - ・得られたデータを自動的にかつ効率的に活用できること
- これらを満たす方策として、土壌診断のスマート化が求められます

スマート化された土壌診断システムとは？

スマート土壌診断システムの概要

土壌診断がスマート化されると、分析データの取得や管理の手間と負担が大幅に軽減され、しかも得られたデータのさまざまな活用が可能となります。現在、北海道大学では、道内の研究機関や企業と共同で「スマート土壌診断システム」を開発中で、数年後には実用化される見込みとなっています。

このシステムではスマートフォンのデジタルカメラとアプリを用います。そのため、特別な知識や技術が必要なく、誰でも簡単に土壌を診断することができます。

また、窒素(N)、リン(P)、カリウム(K)、マグネシウム(Mg)そして土壌のpHなどの複数の項目を短時間で同時に分析でき、その測定データを活用することで、履歴の管理や収量予測も可能となります。さらに低コストで持ち運びも簡単であり、検査後の後始末や廃棄も容易となっています(図4)。

スマート土壌診断システムの手順

まず、生産者が圃場の調べたい場所の土壌をサンプリングし、その土壌に薬剤を加えて養分を抽出します。次に「分析チップ」にその抽出液を垂らすと、成分によって色が変わります。それをスマートフォンのデジタルカメラで撮影してアプリで解析すると、最適な肥料の量が「施肥設計」として提示されるしくみになっています(図5)。

将来的には、分析値などからAIが施肥設計を行い、作物の収量や品質

図4 開発中の土壌診断技術

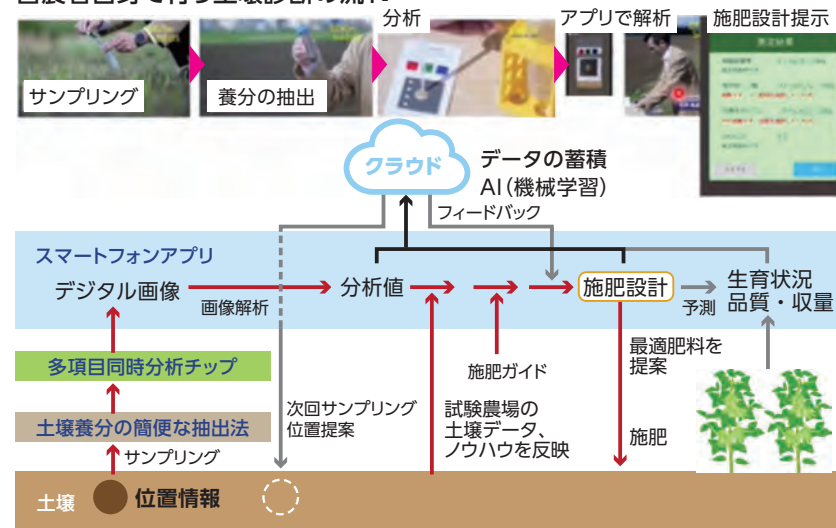
- ・測定にスマートフォン(デジカメとアプリ)を利用
- ・特別な技術や知識が必要なく、操作が簡便
- ・専門の装置が不要なため初期コストはほとんどなし
- ・多項目(窒素、リン、カリウム、pH)を同時に分析
- ・短時間(15分程度)で結果を取得
- ・圃場の多点分析が容易。養分分布のかたよりも把握可能
- ・検査チップは数百円程度で提供予定。アプリは無償
- ・運搬、保管しやすく、後始末や廃棄が容易
- ・測定データの活用で、履歴管理や収量予測が可能



開発中のシステムはスマートフォンなどのIT機器を用いる。開発されたアプリをダウンロードすればいいので、初期コストがほとんどかからない。

図5 開発するスマート土壌診断システム

営農者自身で行う土壌診断の流れ



赤い矢印の流れがシステムの概要。将来的にはサンプリング位置や生育状況、品質や収量などをAIが「予測」できるようになる。

を「予測」する未来図も描かれています。こうしたデータのやり取りはクラウド上で行われます。

分析チップのしくみ

サンプリングした土壌の試料液（土壌から得られた抽出液）から、その土壌の各成分濃度を分析するのが「分析チップ」です（図6）。

分析チップは複雑なものではなく紙製で、表面に試料液が流れる流路が作製されています。試料液を分析チップの1点に垂らすと、流路に沿って試料液が3つに分かれて流れていきます。流れた先には特定の養分に反応する試薬があり、養分に合わせた色が現れます（これを「呈色」といいます）。流路パターンや試薬を変えたりすることで、さまざまな物質の分析に対応させることができます。

そして呈色が起こった分析チップを専用アプリがインストールされたスマートフォンのデジタルカメラで撮影すれば、その画像の解析から各養分濃度が解析され、必要な施肥量が提示されます。

これらのデータはクラウドに送られて保存され、AIによる予測や、その他のさまざまな作業に活用できるようになります。

土壌診断システムが可能にする「持続可能な農業」

冒頭で述べたように、「土壌の状態に基づいて、ちょうどよい時に、ちょうどよい量」の施肥を行うことは生産性と持続性の観点から欠かせません。土壌診断システムは、このような効果的な施肥を行う上で重要な技術といえます。

生産者自身が必要な時に負担なく行える土壌診断システムの普及は、環境への負荷や施肥コストを低減させつつ、収量・品質を高いレベルで安定化させることができ、「持続可能な農業」を実現させるものと期待されています。

図6 分析チップ×IT

分析チップ=紙を基材とする動力源不要の超薄型分析装置



EUのスマート農業の普及状況

スマート農業は、複雑な農業システムを最適にするために情報技術やデータ技術を活用します。こうしたデータの活用によって農産物の品質や収穫量を向上させるとともに持続可能性も高め、さらに農業のプロセスだけでなく、加工・流通・消費などを含めた食料システム全体を強化することができます。そしてスマート農業で利用されるテクノロジーには、モノ同士をつなぐインターネットである「IoT」やロボット工学、AI（人工知能）、ドローンなど、さまざまなものがあります（図1）。

日本においてスマート農業は政府主導で強力に推進されていますが、ここでは海外、特にEU（欧州連合）のスマート農業への取り組みを見てみましょう。

EUは、欧州を中心に27か国が加盟する国家連合です（2020年にイギリスが離脱）。このEUでスマート農業の技術を使用している農家は全体の25%となっており、アメリカの約80%と比べると非常に少ない状況と言えます。

ただし、EUの中でもドイツやフランスのような大国と東ヨーロッパのような小さな国々では、前者の方が高い割合となっています。大きな国では農業の規模も大きく、ロボット農機のような技術を率先して導入するため、スマート農業の利用比率が高くなるためです。

欧州のスマート農業市場は急速に拡大すると予想されていて、2020年の調査では、2023年までに66億ユーロ（24年2月3日レートでおよそ1兆580億円）の市場規模になると計算されています。まだ2023年のデータは出ていませんが、実際にはこの予想を大きく上回っていると予想されています。

スマート農業に関連したEUの政策

大国から小国まで、EUが欧州の農業において優先しているのは、農業を近代化し、資源の無駄づかいを減らすとともに農業の生産性を向上させることです。そこでEUは、スマート農業に関連する以下のような政策を

図1 スマート農業で利用されるさまざまなテクノロジー

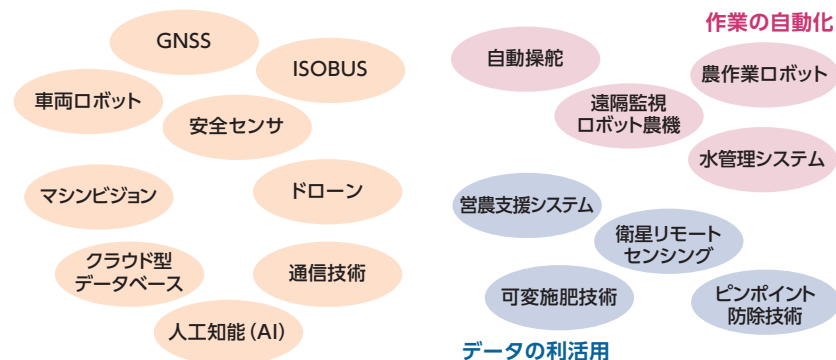


図2 スマート農業に関連してEUが推進する施策

プログラム	テーマ	予算	期限
Horizon Europe	研究とイノベーション	955億ユーロ（約15兆円）	2027
ScaleAgData	欧州農業の競争力と持続性の向上	750万ユーロ（約12億円）	2026
AgriDataValue	スマート農業を通しての競争力の向上	710万ユーロ（約11億円）	2029
Divine	農業データ共有の付加価値の想像	400万ユーロ（約6億円）	2025

「ホライゾン・ヨーロッパ」は955億ユーロの予算を持ち、数百万ユーロの予算を持つサブプログラムがある。こうしたさまざまな施策を通して、農業従事者から消費者に至るまで、フードチェーン内のすべての人々の農業データを共有することで、持続可能性を高め、付加価値を創造することが期待されている。

実施しています。

ホライゾン・ヨーロッパ

「ホライゾン・ヨーロッパ(Horizon Europe)」は、かつて農業への新技術やイノベーションの導入で成功をおさめた「ホライゾン2020」の後継プロジェクトで、スマート農業への多額な投資を行っています。特に農業者やフードチェーンにおけるデータの共有に関するサブプログラムを持っています（図2）。

EUは、テクノロジーに精通した環境にも優しい農業における世界のリーダーとなることを目指しており、そのためにこうしたスマート農業への資金援助プロジェクトを行っています。

図3 EU共通農業政策 (Main Goals of Common Agricultural Policy: CAP 2023-2027)



CAP (共通農業政策)

「CAP (共通農業政策)」は、農業と社会の間でのパートナーシップの構築を目標としたもので、2023～2027年の期間で進められています。CAPには10個の目標がありますが、その中でも、データを共有することで公正な収入や環境を目指す「知識とイノベーション」は重要と考えられています(図3)。

CAPは農場や農業従事者、農村地域におけるデジタル化を促進するとともに、加盟している国はCAPの制度を利用することができると定められています。さらに、予算だけでなく、農家や国の間で共有されるさまざまな情報や知識も農家は得ることが可能となっています。

ファーム・トゥ・フォーク(農場から食卓まで)戦略

現在EUは「欧州グリーンディール」と呼ばれる新しい長期戦略を提唱しており、そこでは気候やエネルギー、産業などでさまざまな施策を行い、雇用を創出しながら、どの地域も取りこぼすことなく、人々の幸福と健康の向上を目指すとしています。この欧州グリーンディールの中核とな

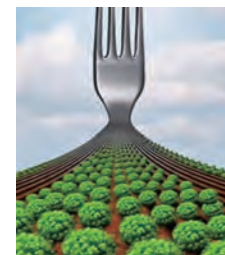
っているのが「ファーム・トゥ・フォーク (Farm to Fork) 戦略」で、これは同時にSDGs (国連が掲げる持続可能な開発目標)とも密接に関連しています。

その主要なテーマとして、食料の生産・消費、加工、流通で発生するフードロスや廃棄を防ぐことを通して、公平な食料システムの構築だけでなく、農家から食卓、または消費者に至るまでのサプライチェーン全体が健康的で、より持続可能なものになることを目指します。

フードロスをなくし、生産や消費、加工などを今より持続可能なものにするためには革新的な技術が必要であり、その点からもスマート農業は「ファーム・トゥ・フォーク戦略」にとって不可欠と考えられています(図4)。

図4 EUファーム・トゥ・フォーク (Farm to Fork) 戦略

食品ロスと廃棄の防止
持続可能な食料生産
持続可能な食料加工と流通
持続可能な食品消費



欧州におけるスマート農業の将来

現在、EUは「生物多様性」「持続可能性」「生産性」のバランスを取るために気候変動にも対応できる安全な食料システムの確立を目指しています。

同時に、農家の日常的な意思決定をサポートするため、データ処理システムを増やし、AI (人工知能) の活用も推進しています。

こうした目的の達成のため、現在欧州では科学的ないろいろなモデルのほか、研究に参加する農家から得られた「生きたデータ」など、スマート農業の利用をめぐる多くのデータや情報が生み出されています。

EUは公式声明として「農業の未来は、複数の金融枠組みを通じて資金提供される農産物分野の研究、イノベーション、能力開発にかかっている」と述べています。研究の現状を背景として、今後の欧州では、「ホライゾン・ヨーロッパ」や「CAP」のような資金援助を中心とした金融的枠組みや計画が、スマート農業の促進をますます加速させていくと考えられます。



おわりに ― スマート農業の意義

序章でも触れたように、現在日本農業の生産現場は、「就農人口の減少」と「農業従事者の高齢化」のような解決すべき喫緊の課題をかかえています。スマート農業はこうした課題解決のためにロボット技術や通信技術、ICTなどの先端技術を活用し、農業の効率化・省人化を図ることを目的として推進されています(図1)。

そして、より広い視点で見れば、SDGsが国内外で浸透しつつある現在、生産性を向上しつつ、環境にも配慮した持続性の高い農法への転換も望まれています。つまり、農業の生産現場では、環境への負荷の低減も避けては通れない課題となっているのです。

環境負荷低減に向けた対策例 ― 化学肥料の抑制

たとえば、化学肥料の過剰な使用は生産コストの上昇など営農上の問題を発生させますが、それだけではありません。

今までの画一的な化学肥料の散布方法は、圃場における作物の生育がすべて均一であるという前提の下で行われてきました。しかし、圃場の土壌栄養状態や土砂の堆積などの要因によって、1つの圃場でも作物が均一に生育するわけではありません。

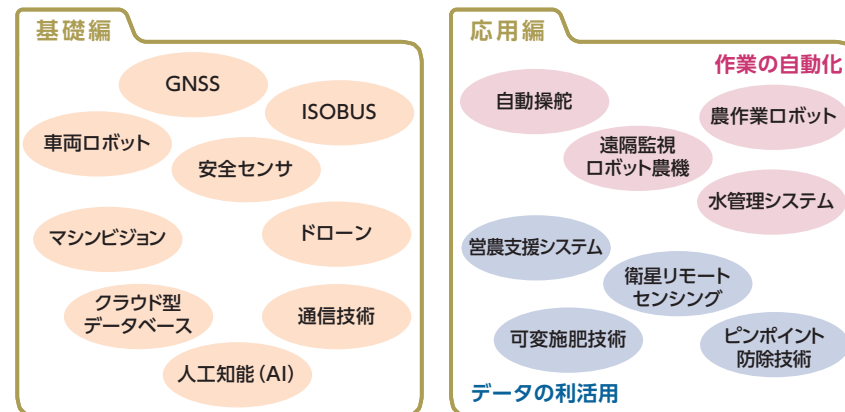
このため、作物の生育状況を見逃して均一に化学肥料を散布してしまうと、あるところは肥料が足りず、反対にあるところは過剰に散布することになります。これでは一定の品質の作物を安定的に収穫できなくなるばかりか、過剰に散布したところからは、吸収されなかった化学肥料が降雨によって河川に流れ出し、環境に負荷を与えることになります。

この問題を解決するための方策として、応用編・第7節で取り上げた「可変施肥技術」があげられます(図2)。リモートセンシングで得られた作物の生育状況のデータや、コンバインに装備されたセンシング機器で集めた収穫量のデータを反映させれば、播種時の基肥量を肥沃度マップから設定したり、生育途中の追肥量をその時々生育状況から判断して局所施肥や可変施肥を行ったりすることが可能となります。

こうして無駄な化学肥料の投入をなくせば、営農上のコスト削減はもち

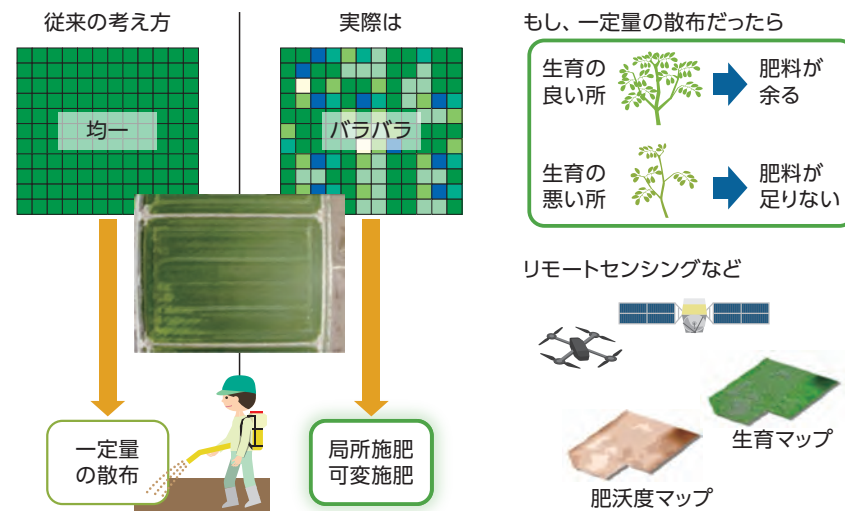
図1 本書で取り上げたスマート農業の先端技術のまとめ

「農業」×「先端技術」



ロボット、ICT、IoT、AIなどの先端技術を導入することで、より賢いスマートな農業を目指す。

図2 環境負荷低減の具体例①



作物の生育状況や圃場の土壌の栄養状態はすべて同じではない。データに基づいた化学肥料の使用は、環境負荷の低減に大きく貢献する。

ろん、環境への負荷を大幅に低減させることが可能となるのです。

環境負荷低減に向けた対策例——化学農薬の抑制

いつ発生するかわからない病害虫への防除対策も同じです。いつもと同じ時期に、いつもと同じ量の化学農薬を全体に散布するような方法ではなく、作物の生育状況や環境のデータから発生を予測することが大切になります(図3)。

こうした予測に基づいて害虫の天敵動物を活用したり防虫ネットを使用したりするなど、化学農薬に頼らない物理的な対策を検討することが重要となります。農薬を使用するにしても、応用編・第8節で取り上げた「ピンポイント防除技術」の導入や、生分解性の除草剤の使用、飛散防止用ノズルによる散布などを行うことで環境負荷を低減させることができます。これらの試みは、理想論の域ではなく実際各地で行われているのです。

「みどりの食料システム戦略」とスマート農業

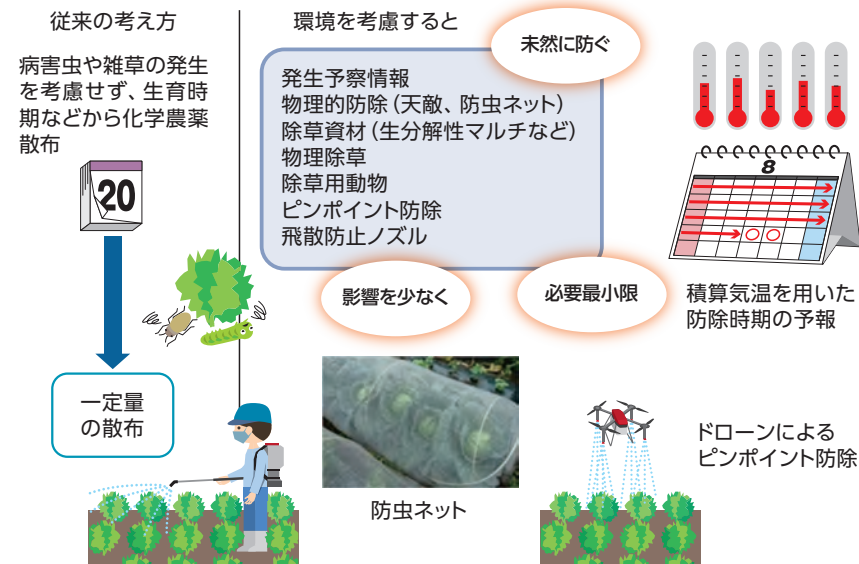
今まで述べたように、現在の日本農業は、環境問題をも含めたさまざまな課題に取り組んでいます。その背景には、農林水産省が掲げている「みどりの食料システム戦略」があります。ここでいう「食料システム」とは、調達から生産、加工、流通、消費まで、あらゆる関係者のつながりによって成り立っている「食」を、大きなしくみとして捉えたものです。

「みどりの食料システム戦略」は、未来の「食」を守るために、生産から消費までの食料システムを環境にやさしい(=みどり)ものにして、「食」を支えていくことを目的としています。そのコンセプトは、「農林水産業の生産力向上と持続性の両立をイノベーションで実現する」ことです(図4)。

そして、食料システムの各分野に対する中・長期的な取り組みは、以下ようになります。

- ・エネルギー調達：脱輸入・脱炭素化・環境負荷軽減の推進。
- ・生産：イノベーション等による持続的生産体制の構築。
- ・流通・加工：無理、無駄のない持続可能な加工流通システムの確立。
- ・消費：環境にやさしい持続可能な消費の拡大や食育の推進。

図3 環境負荷低減の具体例②



化学農薬中心の防除体系ではなく、環境に配慮するという視点に基づいて防除体系を考え直す必要がある。

図4 みどりの食料システム戦略(農林水産省)

食料・農林水産業の生産力向上と持続性の両立を
イノベーションで実現する

みどりの食料システム戦略で目指す

- ・作業の省力化・省人化
- ・作業の安全性向上
- ・化学農薬・化学肥料の使用量低減

などさまざまな効果が期待されるスマート技術を実践

「みどりの食料システム戦略」では、これらを取り組みとして掲げ、環境への負荷を低減させることを推し進めようと考えており、そのための具体的な方法は、以下のとおりです。

- ・作業の省力化・省人化
- ・作業の安全性の向上
- ・化学農薬・化学肥料の使用量低減

これら具体的な方法は、今まで説明してきたスマート農業と大きな関係があることが、もうおわかりかと思います。つまり、スマート農業を実践することは、「農林水産業の生産力向上と持続性の両立をイノベーションで実現する」ことにほかならないのです。大規模経営だけでなく中小家族経営、さらには平地から中山間地域、若者から高齢者まで、あらゆる人々がそこでのメリットを享受できることを目指しています。

このように、スマート農業とは農業現場の効率化・省人化だけでなく、生産から加工、流通、消費までの食料システム、ひいては日本の「食」全体にも大きな影響を与える方策として位置づけられているのです。

本書をきっかけとして、スマート農業を実践する農業従事者、スマート技術の普及・導入を進める技術者や指導員、そしてスマート農業を知って次世代の農業を支える若い人たちが少しでも増えることを願ってやみません。



「スマート農業オンライン講座」(YouTubeで公開中)

https://www.youtube.com/@hokudai_smart_agri



北海道大学スマート農業教育拠点ウェブサイト

<https://smart012.wixsite.com/website>



「スマート農業オンライン講座」講師一覧

- 石井一暢 (北海道大学大学院農学研究院)
- 田村知久 (公益財団法人とかち財団)
- オスピナ・リカルド (北海道大学大学院農学研究院)
- 小林伸行 (株式会社スマートリンク北海道)
- 齋藤伸一 (NTTコミュニケーションズ株式会社)
- 岡本博史 (北海道大学大学院農学研究院)
- 松浦賢太郎 (北海道大学招へい教員/ソニーグループ株式会社)
- 鳥潟與明 (一般社団法人東光虹川ものづくり財団)
- 三浦尚史 (株式会社三浦農場)
- 野口 伸 (北海道大学大学院農学研究院)
- 若杉晃介 (国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構)
- 柚山奈々 (株式会社クボタ)
- 志賀弘行 (ホクレン農業協同組合連合会)
- 原 圭祐 (地方独立行政法人北海道立総合研究機構)
- 多田和博 (株式会社トプコンポジショニングアジア)
- 白鳥秀紀 (エム・エス・ケー農業機械株式会社)
- 丹羽昌信 (ホクレン農業協同組合連合会)
- 中川 宏 (NTTコミュニケーションズ株式会社)
- 宿谷貴博 (株式会社ビコンジャパン)
- 遠山健一 (ホクサン株式会社)
- 麻生英文 (株式会社誠和)
- 江丸貴紀 (北海道大学大学院工学研究院)
- 志藤博克 (国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構)
- 小松知未 (北海道大学大学院農学研究院)
- 渡慶次学 (北海道大学大学院工学研究院)
- 石田晃彦 (北海道大学大学院工学研究院)
- Lucas Hüer (ECOS Consult GmbH)

スマート農業オンライン講座 フォローノート

2024年3月1日 発行
2024年7月7日 第2刷
2025年11月1日 第3刷
2026年3月1日 第4刷

発行・編著 北海道大学スマート農業教育拠点
〒060-0811
北海道札幌市北区北11条西10丁目
国立大学法人北海道大学
北方生物圏フィールド科学センター内
smart@fsc.hokudai.ac.jp

制 作 株式会社誠文堂新光社

この冊子は、農林水産省「令和5年度スマート農業教育推進委託事業」において制作しました。

この冊子は「令和7年度スマート農業に関する農業教育機関の指導者等向け研修委託事業」「令和7年度スマート農業に関するオンライン研修用教材作成等委託事業」において増刷しました。