

戦略研レポート

2014.3.31

進化する農業 —技術フロンティアの変遷—

CONTENTS

はじめに	2
Ⅰ．農業技術の全体像	2
Ⅱ．農業技術の概要	3
1. 栽培	
2. 農業資材技術	
3. 農業関連技術	
Ⅲ．近年の農業技術動向	10
1. DNA マーカー育種	
2. 精密農業	
3. 植物工場	
おわりに	15

進化する農業 —技術フロンティアの変遷—

産業調査第二室 松浦武蔵

はじめに

農業に関わる技術は、長い年月をかけて磨き上げられてきた。その過程では、生産しやすいもの、栄養価の高いもの、おいしいものを効率よく栽培するために、数ある中から、自分たちに都合のよい品種を選択して利用するようになった。また、いつ種子をまいたらよいのか、何をしたら安定的に生産できるのかなど、生産プロセスの最適化も進められた。加えて、農業以外の分野で発展した技術を導入して、農業生産を増加、効率化させてきた面もある。例えば、現在では普通に使われる肥料や農薬など

も、当時の化学の最先端の知識を農業に導入したものである。

こうした技術の進歩、導入によって農業は進化を遂げてきた。本稿では農業技術の歴史を俯瞰するとともに、近年の技術開発の方向性や先端的な事例を紹介することで、時代ごとの農業技術のフロンティアの変遷を概観する。なお、農業には大きく分けて、植物を栽培する農耕と動物を飼育する畜産とがあり、相互に密接な関わりを持っているが、本稿では農耕の分野を中心に見ていくこととする。

I. 農業技術の全体像

農業生産には、最大限の効果が得られるように、さまざまな技術が導入されている。図表1は一般的な農業生産の主な工程とそこで利用される技術を表したものである。

農耕地（農地）は人の手が加わった人工的な場所であるが、新たな土地で農耕を開始するには、農業用水を確保したり「整地」を行うことが必要である。次に、土地が農作物の栽培に適するように、「起耕」が行われる。「起

耕」とは鋤（すき）や鍬（くわ）などで土を起こす作業であり、この際に肥料や土壌改良資材などの散布、土を細かくする碎土などを行い、保水性や通気性、排水性を高め、養分をバランスよく保持し、さまざまな土壌生物が生息するように、総合的に地力（農地としての生産能力）を高めていく。「施肥」は、作物の生育を助けるために肥料を施す作業である。作物が収穫されることによって土壌内の養分が持ち去られるため、種をまく前や、作物の

図表1 生産工程と農業技術の関連性

工程	作業内容	技術要素						
		栽培	農業資材技術			農業関連技術		
			育種	肥料	農薬	土木	機械	情報
整地	場所選定、区画整備、環境整備					○		
起耕	土づくり、土を耕す	○			△		○	△
施肥	肥料散布	○		○			○	△
播種	種まき	○	○				○	△
生長管理	水やり、農薬散布（除草）、追肥、中耕	○	○ _(*)	○	○		○	△
収穫	作物の収穫、洗浄、梱包	○	○ _(**)				○	○

注：○は先進国の農業では一般的に使われているもの。△は一部の農業で使われているもの

（*）作物の生長がよくなるような品種改良

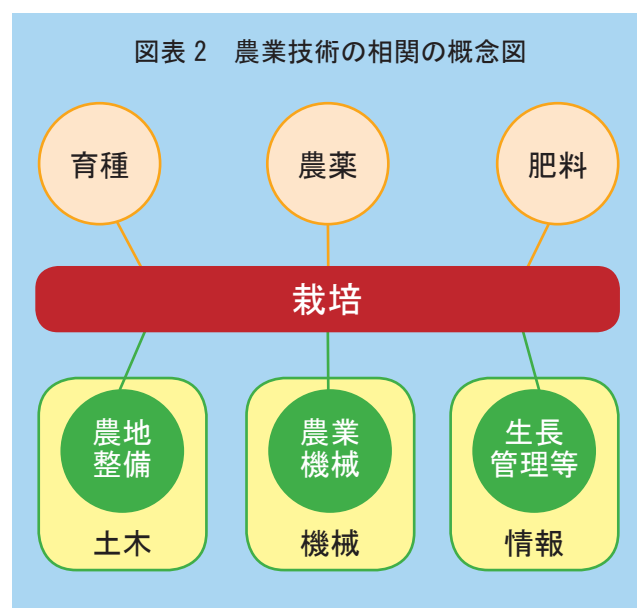
（**）生産者が収穫しやすいような品種改良

生産中にも適宜行われる。「播種」とは種をまく作業だが、種以外にも例えば苗を植える作業もこの工程に含まれる。「生長管理」は、作物を生長させる間の工程を指す。作物が生長している間は、作物の状態に応じて、水を与えたり、肥料を追加したり、病気や害虫への対処、もしくは予防のために農薬を散布するなど、作物が最良の状態で収穫できるように管理する。そして、作物が生育すると「収穫」が行われ、作物の洗浄や梱包といった、出荷に向けた準備が行われる。

農業技術とは、これらの過程で用いられる技術全てを指すが、その中でも、作物の生長プロセス全般に関わる「栽培」の技術は、起耕から収穫までの幅広い段階で用いられ、農業生産の根幹となる技術と位置付けられる。そのほか、生産者や消費者にとってメリットのある品種を生み出す「育種（品種改良）」の技術や、それ自体の生産技術も含む「肥料」や「農薬」に関する技術、さらには「土木」技術や「機械」技術が農業技術の構成要素となっている。また近年では、生産環境の制御や収穫時期の判断など、さまざまなポイントで「情報」技術を利用するケースも増えてきている。

これらの技術は、農耕の領域で発達してきた「育種」、

「肥料」、「農薬」の「農業資材技術」と、農業に限らずさまざまな領域で発展を遂げてきた「土木」、「機械」、「情報」の「農業関連技術」に大別できる。そして「栽培」の技術は、それ以外の6つの技術をいかに利用するかを体系化した技術という側面もある（図表2）。



Ⅱ．農業技術の概要

ここでは、農業生産の根幹をなす「栽培」の技術と、「育種」、「肥料」、「農薬」の農業資材技術、「土木」、「機械」、

「情報」の農業関連技術のそれぞれについて、これまでの歴史と現状を概観する。

1．栽培

個別プロセスの統合・最適化

第Ⅰ章図表1で示したように、栽培技術は土地を農地にするための起耕から始まり、気候風土などの環境を考慮した生産品目の決定、播種、作物育成中の土壌、施肥、水等の管理、病虫害防除、雑草防除など、作物を収穫するまでの各プロセスに関わりを持ち、そこに含まれる要素技術は、極めて多岐にわたる。「農学」と呼ばれる学問領域には、非常に多くの分野が存在する。日本の文部科学省がまとめた「学科系統分類表」によると、農学には226の分野が存在するとされている。これらの全てが栽培技術の基盤となっており、各分野の知識を生産

物や気象条件、土壌環境などに合わせて統合・最適化することが栽培技術の基本的な役割である。

栽培技術には、長年にわたって農作物を生産してきた農家や篤農家が蓄積した経験によるものが多いが、古くから伝わる栽培法が科学的にも優れていることが証明される例も少なくない。また、学問の体系として整理される以前から、各種の「農法」や「技法」という形で具現化されてきている。焼畑農法やヨーロッパで開発された二圃式／三圃式農法、日本で発達した接ぎ木の技法などがその典型である（次ページ囲み参照）。

焼畑農法

焼畑農業とは森林を伐採した後、樹木を焼き、そこから放出された養分を肥料として使う農法である。数年間農業を行い、土壌中の肥料分がなくなると、別の場所に移動して同様の作業を行うといった具合に繰り返され、森林に戻るまでの数年から数十年の間は休耕される。その歴史は古く、新石器時代にエジプトやメソポタミアの河川流域で起こったとされている。南米やアフリカ、アジアなどの熱帯で広く行われ、かつては日本国内でも行われていたが、広大な土地を必要とするため、現在の効率的な農業に不向きなことから、あまり見られなくなっている。

三圃式農法

三圃式農法はヨーロッパの広大な土地を活かし、いくつかに分割した農地で、場所ごとに休耕期間を設け、土地を休ませることで土壌中の肥料分、虫、菌などの状態を良くすることによって、農業生産を安定させる農法の一つである。古代ギリシャ、ローマ時代から普及し始め、13世紀までには一般的なものとなった。ところが、11世紀から13世紀に掛けて、大規模な開墾が進められるようになると、肥料として利用していた家畜の糞尿が不足し、家畜頭数を増やす必要性が出てきた。そこで14世紀頃から三圃式のサイクルの中で、家畜の飼料としてクローバーを主とした牧草の栽培を始め、さらに18世紀後半になるとカブなどの根菜飼料も導入する輪栽式農業と呼ばれる栽培手法が確立していった。

接ぎ木

接ぎ木と呼ばれる生産技術は、主に野菜や果樹を繁殖させるために利用され、2つの別の植物を発芽から間もない時期に、葉に近い部分と根に近い部分とに切断して、1つにつなぎ合わせて育てるものである。接ぎ木は、もともと中国で果樹の増殖技術として発達し、3000年前には柑橘類で接ぎ木が行われていた。日本へは仏教伝来とともに伝えられたとされ、1697年に書かれた「農業全書」には接ぎ木の方法や管理法が解説されているため、当時既に果樹や花木では接ぎ木が行われていたものと推定される。野菜における接ぎ木技術は、日本で1927年にスイカのつる割病対策として、カボチャ台木にスイカを接ぎ木したのが始まりとされ、その後に急速に普及していった。最近では、育苗の分業化や作物の増収に有効なことから、野菜の接ぎ木が欧州や北米、東アジアなど海外においても急速に普及しており、その多くは日本で開発された技術である。

資材技術、関連技術の統合

栽培技術における統合・最適化の対象は、前述の農業資材技術（育種、肥料、農薬）や同関連技術（土木、機械、情報）にも及ぶ。初期の農耕は天水（降雨）任せだったため、十分な降雨を得られる地域を選んで生産するか、水をあまり必要としない作物を選択するかが要求され、大きな制約要因となっていたが、BC6000年頃に土木技術を導入して灌漑設備を建設し、より広い地域で十分な水を確保することが可能になったことで、農業の限界は大きく広がった。また、育種や肥料の技術も、早い段階から農業生産に導入されていた。

その後、大きな転機となったのは、科学技術が多くの産業に導入され、生産様式が一変した18世紀から19世紀にかけての産業革命の時期である。農業においても、蒸気機関や内燃機関といったさまざまな機械や、化学的なプロセスで人工的に生産された肥料や農薬が導入され、農業生産の効率は飛躍的に向上した。育種において体系化された遺伝学の知見が活用されるようになったのもこの時期である。

近年では、情報技術、ITの導入に注目が集まっている。従来は生産者が畑の状態や作物の生育状況を観察

して、過去の経験を頼りに最適とされる栽培管理を行ってきたが、ITを導入することにより、環境や生育状況を客観的なデータや数値の形で把握し、生産に活用できるようになり、安定生産や省力化、コストダウンのためのツールとして活用されるようになってきた。

環境変化対応から環境制御へ

栽培技術は、地域ごとの気候や風土、気象の変化、病虫害の発生など、その時々環境変化に対応できるように開発され進歩を遂げてきた。しかしその一方で、栽培環境そのものを制御しようとする技術開発も行われてきた。例えば、ビニールハウスは温度や湿度、二酸化炭素濃度などを調整して、作物に最適な生育環境を人為的に作ることで生産性を高めたものである。このビニールハウスも歴史はローマ時代の温室までさかのぼることができる。栽培技術の歴史においては、環境変化対応と環境制御との二つの大きな流れがあったといえるだろう。この環境制御技術の発達によって、季節を問わずにさまざまな作物を栽培することが可能になった。この技術の延長にあって、近年話題となっているものが植物工場や精密農業である。これらについては第Ⅲ章で詳述する。

2. 農業資材技術

(1) 育種（品種改良）

現在生産されている農産物の多くは、人類が利用しやすいように品種改良が行われている。生産段階では、病害虫に強い、収量が高いなど、生産性を向上させたり、作物としては食味を良くしたり、食文化に合わせた形状や成分のコントロールなど、さまざまな目的によって、改良が続けられてきた。ここでは、品種改良の歴史とそれに用いる育種技術がもたらした農業への影響、近年の技術動向について述べていくこととする。

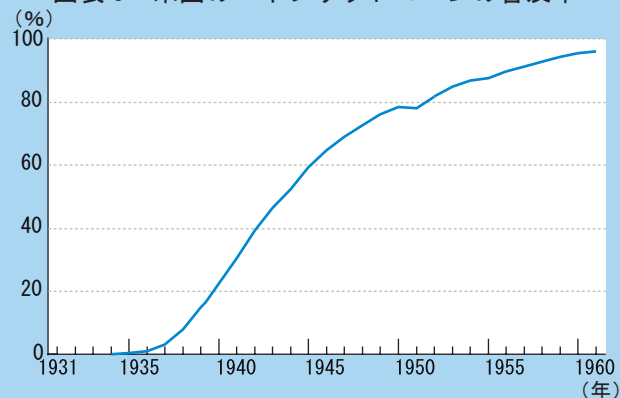
育種の歴史

農作物の品種改良は、人類が農耕を始めた頃から行われていたと考えられている。当初は自然の中から偶然見つけられた都合のよい品種を選抜し、農業生産に使用するということが行われていた。また、生産した作物のうちから、よい作物のできる品種とそうでないものを取り捨選択して利用していた。こうした手法は「選抜育種法」と呼ばれ、品種改良の基礎となる技術として長い間利用され続けている。

また、自然界から優良な種子を集めるという手法については、BC3000年頃にファラオのサンクカラが、ミラの防腐用としてのシナモンを求めて紅海を下ってアデン湾まで船を出したという記録が残っている。このように自国以外や他地域で生息する種子を採集して持ち帰り栽培する手法は「導入育種法」あるいは「プラントハンティング」と呼ばれて、古くから行われてきた。中世では宣教師が海外から自国へ持ち帰るなど、プラントハンターの役割を担っていた。

19世紀になると、後の育種に多大な影響を及ぼすメンデルの法則が発見される。メンデルの法則とは、異なる品種を交雑した雑種第一代では片方の親の形質だけが表れるという優勢の法則、雑種第一代は均質であること、しかしさらに雑種第二代では形質が分離することを発見したものである。この法則はメンデル以前にも多くの研究者によって発見されていた。例えば、1669年にはJ.J. ベッヘルが白いハトと黒いハトを掛け合わせることによって、子孫の体の色の変化について研究した史実がある。そのほか、ドイツのJ.G. ケルロイターがタバコ属の植物を研究材料として、英国のT.A. ナイトはエンドウで、交雑に関する研究を行っていた。

図表3 米国のハイブリッドコーンの普及率



出所: The Seed Industry in U.S. Agriculture

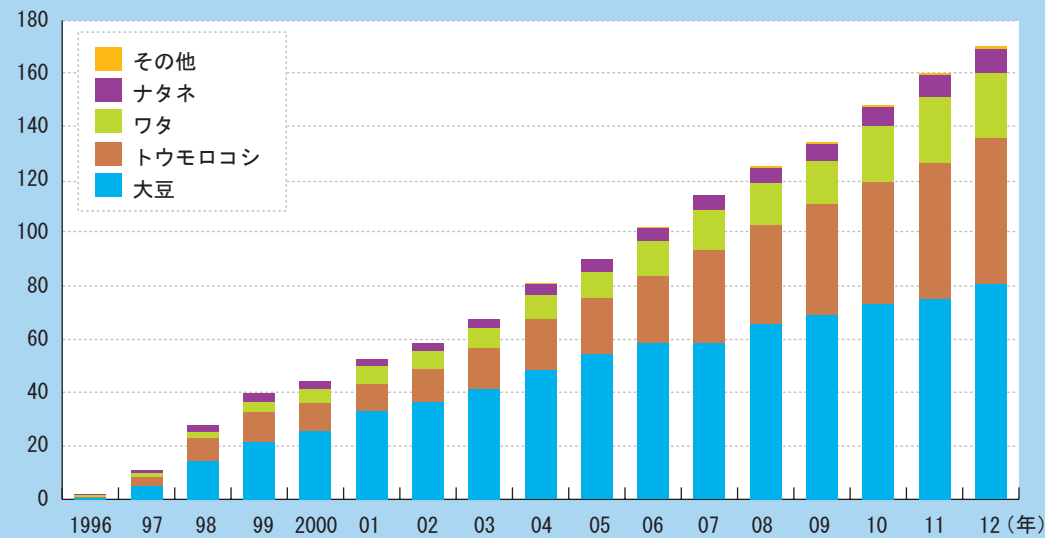
メンデルが遺伝法則を発見したエンドウの実験は1856年から7年間続けられ、1865年にブリュン自然研究会で口頭発表されたが、あまりにも斬新であったことや、同時期にダーウィンが種の起源を発表し、そちらが議論的となっていた背景もあり、すぐに日の目を浴びることとはなかった。メンデルの法則の真価が認められ、自然科学における基本原理となったのは、1900年にオランダのH.M.ド・フリースとドイツのC.E. コレンスによって再発見されてからのことである。この再発見によって、現在でも広く利用されている品種改良の手法である「交雑育種法」が確立された。交雑とは子孫を得るために遺伝的に異なる雌雄を掛け合わせることをいい、突然変異とともに変異を拡大する主要な手段である。また、人為交雑による改良は自然交雑に近い改良法であるため、育種法の主要な技術として多く利用されるようになった。

異なる品種・系統や、異なる種の間で交雑したときの子孫である雑種（ハイブリッド）は、両親のどちらよりも旺盛な生育を示すことが多く、これを雑種強勢という。後のトウモロコシの品種改良の基本原則となるもので、前述のケルロイターやナイトなどの時代に、育種家の間では経験的に発見されていた技術である。

このような背景の下、1920年頃、米国コネチカット農業試験場のD.F. ジョーンズによって、トウモロコシの種子であるハイブリッドコーンなど、いわゆるF1（first filial generation）ハイブリッド種子が開発された。これは雑種強勢の原理が働いて生育が良くなるほか、大きさや形状、収穫時期がそろうので、大量生産に向く品種であった。開発当初こそ農家に受け入れられなかったが、1930年代の旱魃によって従来品種が不作に陥ったことをきっかけとして、ハイブリッドコーンは全米で急速に普及し、1960年までの間にトウモロコシの作付面積の大部分がF1ハイブリッド種子に置き換わっていった（図表3）。

(百万ha)

図表 4 遺伝子組換え作物の作付面積推移



出所：日本モンサントHPを参考に作成

この F1 ハイブリッド種子のもう一つの大きな特徴として、優良な性質が次世代には受け継がれないという点がある。そのため、農家は従来のように種子を自家採種できなくなり、毎年、種子業者から購入する必要が生じた。これは「種子は自家採種して毎年使用するもの」という慣習に大きな変化をもたらし、種子は農家が自給するものから購入資材へと変質していった。1926 年にはハイブリッドコーンの種子生産と販売のためにハイブレッッド・コーン社が設立された。現在デュポン社の子会社である世界最大の種苗会社デュポン・パイオニア社の誕生である。こうした種子の資材化は、民間企業の研究開発を活発にし、産業の拡大とともに品種改良の技術進歩にも大きく寄与することとなった。

交雑育種法は現在でも主要な育種技術として広く利用されているが、1990 年代に入ると新たな技術が登場した。バイオテクノロジーの進化、即ち、「遺伝子組換え技術」を使った種子の開発である。従来の品種改良が、異なる優良な形質を持った種子の掛け合わせによるものであるのに対し、遺伝子組換えによる品種改良は、遺伝子を直接操作することにより、新たな形質を生み出す技術である。遺伝子組換え技術は、1973 年に米国の分子生物学者が大腸菌を人為的に形質変換させることに成功したことによって端を発する。技術が開発された当初は、微生物での研究が進み、医薬品分野での普及が先行していたが、1980 年代半ばに入り、植物にも応用されるようになった。1994 年には、ベンチャー企業のカルジーン社（後にモンサント社に買収される）が世界初の遺伝子組換え作物となる、完熟後でも日持ちがよい「フレーバーセーバートマト」を

作り出し、米国で販売された。次いで 1996 年には、害虫に抵抗性のあるトウモロコシを皮切りに、大豆等の主要品目における遺伝子組換え作物の商業栽培が始まった。その後、遺伝子組換えにより、害虫に対する抵抗性や特定の除草剤への耐性を組み込むことで、農薬の使用量や必要な作業量を

削減し、従来の F1 ハイブリッド種子よりも価格は高くなるが、農業生産全体のコストを下げることを可能とする品種が数多く開発されていった。

その結果、遺伝子組換え種子は 2012 年では 28 カ国、1 億 7,000 万 ha まで作付面積を急速に伸ばしてきている（図表 4）。主要農作物の全世界作付面積のうち、ワタは 69%、大豆 78%、トウモロコシ 32%、菜種 27% が遺伝子組換え種子に置き換わっている。

近年の動向ー遺伝子技術の利用ー

近年の品種改良において注目されているのは「遺伝子」をキーワードとする技術である。遺伝子組換え種子のほかにも、遺伝子技術を利用した育種法が開発されている。近年では、遺伝子の解読技術が急速に進み、植物はもとよりヒトに至るまでさまざまな種のゲノム（全遺伝情報）が解読されている。こうして得られたゲノムを活用した品種改良方法が「DNA マーカー育種」である。

DNA マーカー育種とは、従来同様の交配育種を用いた技術ではあるが、遺伝情報を利用することで効率的に交配育種を進める技術である。この技術開発が進むことによって、新品種の開発期間を大幅に短縮できることから、現在研究が盛んとなっている。また、DNA マーカー育種によって作られた品種は、遺伝子を直接組み換えて作られる新品種、いわゆる遺伝子組換え作物ではないため、遺伝子組換えに対する嫌悪感を持つ消費者へも受け入れられるものとなり、研究機関や民間企業でも積極的な研究開発が進められている（詳細は第Ⅲ章にて後述する）。

（２）肥料

化学肥料の登場により、農業生産は大幅に拡大した。現在主流となる化学肥料は、窒素、リン酸、カリウムの３要素であり、窒素は石油化学から生産され、リン酸とカリウムは鉱物資源を利用している。

肥料の歴史

現在では、植物に必要なエネルギーや栄養素の解明が進んできているが、農耕の初期段階ではそのような知識はなく、農耕に適した肥沃な土地を見つけて作物栽培を行っていたと考えられている。ところが、人類が同じ土地に定着して農耕を営むようになると、土壌から失われた養分を補うために、人や家畜の糞尿、山野草、草木灰や、これらを腐熟させた堆肥や厩肥（きゅうひ）など、経験的に効果の知られていた物質を肥料として土地に施用する手法が広まった。

商品性の高い作物が栽培されたり、より多くの収量を求めるようになると、効果の強い肥料の需要が高まり、肥料は商品として販売されるようになった。しかし肥料が植物の生育に影響を与えるメカニズムは 19 世紀に入るまでは解明されなかった。転機となったのは、1840 年にドイツの J.F.von リービヒが発表した「有機化学の農業および生理学への応用」である。リービヒは、植物が水と二酸化炭素といくつかの無機塩で育つことを提唱し、翌 1841 年には、植物の生育に必要な 3 要素が窒素、リン酸、カリウムであること、作物は肥料として与えた養分量の増加に比例して増収するが、1 つの養分でも不足すると他の養分が十分でも作物の生育が制約されるという「最小養分律」を確立した。

また、ほぼ同時期に、上述の 3 要素が世界で発見、採掘されるようになっていた。1802 年には A.von フンボルトがペルーでグアノを発見した。グアノとは海鳥の糞の堆積物であり、窒素とリン酸、カリウムを含んだものである。このグアノは、リービヒの発見以前から肥料としての効果が高いことが知られており、ヨーロッパへ輸入販売されていた。1830 年代にはチリ（当時のペルー領）で窒素原料となるチリ硝石が採掘され始めた。さらに、1856 年にはドイツのシュタスフルトでのカリ鉱床が発見されたり、リン鉱床が米国やロシアで発見されたりと、化学肥料を生産するための環境が次第に整ってきた。

イギリスの J.B. ローズは、骨粉やリン鉱石に硫酸を作成させる方法で水溶性の過リン酸石灰を作り、1843 年に

生産販売を開始した。これを嚆矢として、以降、肥料は化学肥料が中心となっていった。1861 年にはシュタスフルトの鉱床を原料供給源とする塩化カリ工場が建設され、生産を開始している。

ところが、19 世紀末になると、窒素を得るために必要なチリ硝石の埋蔵量に枯渇の危機が訪れ、新たな窒素資源の供給ソースを開発する必要性が生じ、窒素肥料を合成するための研究が活発化した。1906 年にはドイツの A. フランクが生石灰とコークスから石灰窒素を工業的に製造する技術を発明した。そして 1913 年には、世紀の大発明といわれるハーバー・ボッシュ法によるアンモニア合成の工業化が開始された。その後、化学肥料を用いた農業が主流になり、肥料の使用量は大幅に増加した。1ha 当たりの肥料の使用量は 1950 年の 28kg から、1990 年では 207kg と 7 倍以上になっている。

化学肥料の登場は、農業に 3 つの大きな変化をもたらした。第 1 に、自然の制約を受けずに大量の肥料を安価に供給することが可能となり、多肥集約栽培を可能とした。第 2 に、従来の有機肥料に比べて 3 要素の含有量が高く、より少ない量で同様の効果を得られることから、肥料の運搬や施肥の労力を大幅に軽減し、労働生産性を向上させた。第 3 に、従来の有機肥料に比べて化学肥料は即効性があり、必要なときに必要なだけ施肥することが可能であるため、土地生産性を高めることにも大きく寄与した。また、農業の労働生産性が高まったことで、農業に従事していた労働力を他産業にシフトさせる余地を生じさせ、工業化の進展を後押しした。

近年の動向～技術の成熟と資源制約の浮上

肥料分野の技術はどれも既に成熟しており、他の技術領域に比べて大きな動きは乏しいが、窒素については、東京工業大学の細野秀雄教授のグループが研究している新技術開発の可能性に注目が集まっている。この研究では、 $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ というセメントの構成成分の構造中に電子を取り込んだ化合物が触媒として働き、アンモニア合成を従来比の 10 倍で進める可能性があると考えられ、今後の展開に期待が掛かっている。

他方、リン酸とカリウムについては、現段階ではいずれも有限な埋蔵資源からの供給に頼っている。加えて、その産地がリン酸では米国、中国、モロッコの上位 3 カ国で全体の約 3 分の 2、カリウムではカナダ、ロシア、ベラルーシの 3 カ国で 6 割弱を占めており、大きな偏りがある

図表 5 世界の農薬および作物保護用農業バイテク製品の売上高推移 (単位：百万ドル)

用 途	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年
除草剤	18,470	21,560	19,767	19,335	21,675
殺虫剤	9,720	11,496	11,471	12,170	13,982
殺菌剤	9,325	11,695	11,176	11,475	13,305
その他農薬	1,240	1,379	1,309	1,215	1,343
農薬小計	38,755	46,130	43,723	44,195	50,305
農業バイテク製品	7,062	9,150	10,570	12,060	15,685
(バイテク製品割合)	15.4%	16.6%	19.5%	21.4%	23.8%
合計	45,817	55,280	54,293	56,255	65,990

出所：Phillips McDougall (「世界化学工業白書」各年3月増刊号掲載) をもとに作成

ことから、今後の供給不安や原料価格高騰の可能性が指摘されている。

(3) 農薬

日本の農薬取締法によると、「農薬」とは、農作物（樹木及び農林産物を含む。以下「農作物等」という。）を害する菌、線虫、だに、昆虫、ねずみその他の動植物又はウイルス（以下「病害虫」と総称する。）の防除に用いられる殺菌剤、殺虫剤その他の薬剤（その薬剤を原料又は材料として使用した資材で当該防除に用いられるもののうち政令で定めるものを含む。）及び農作物等の生理機能の増進又は抑制に用いられる成長促進剤、発芽抑制剤その他の薬剤をいう。」と定義されている。要は、「病害虫や雑草から農作物を保護したり、生産性を向上させる薬剤」である。さらには、近年では「農業バイテク製品」と称される遺伝子組換え種子（後述）も農薬と定義されている。

殺菌剤とは、農作物に悪影響を及ぼす細菌、カビ、ウイルスなどの繁殖を抑えたり、絶滅させたりする薬剤をいう。播種前に予防的に使用される土壤消毒剤や植物体に浸透移行して予防治療を行う浸透性薬剤、種子消毒剤などがあるが、主流を占めるのは茎葉散布剤である。除草剤は、生産する農作物も含めて接触した全ての植物を枯らす非選択的除草剤と、農作物には害を与えず対象とする植物を枯らすことのできる選択的な除草剤に分けられる。

農薬の歴史

約 3000 年前のローマ時代に、麦の種を消毒するためワインに浸したり、植物の灰や硫黄を畑にまいたりしていたという記録が残っており、これが農薬の起源ではないかという説がある。農薬が商品化された事例としては、1700 年代の欧州で、除虫菊の粉が害虫の防除に効果があるとして、化学的なメカニズムは不明のまま生産、販売されたケースがある。1851 年には、フランスの M. グリソンによって石灰と硫黄を混ぜた「石灰硫黄合剤」がブドウの病害に効果のある殺菌剤として開発された。同様に 1880 年に

は、ブドウの病害などに効果を発揮するものとして、「ボルドー液」という硫酸銅に生石灰を混ぜたものが商品化されている。

そして 1938 年、スイスの P.H. ミュラーによって今日の農薬の原点とも呼ばれる DDT（ジクロロ ジフェニル トリクロロエタン）が開発された。衣服の防虫剤を研究している過程において、DDT の強い防虫効果が注目され、商品化されたものである。また、DDT は化学産業のプラントで副生してくる塩素を利用するので、安価に大量合成可能だったことも、商品化の要因となった。その効力は、第 2 次世界大戦後に蚊やしらみなどの撲滅に威力を発揮した。この DDT がそれまでの農薬と大きく異なる点は、昆虫だけに薬効を発揮し、人間に対しては毒物ではないという点である。DDT は画期的な殺虫剤として「人類最大の貢献をした化合物」と呼ばれるに至った。DDT の成功を受けて、世界中で「第 2 の DDT」を研究開発する競争が起こった。フランスでは BHC、ドイツではパラチオン、米国ではディルドリンが開発され、各国の農業生産に導入されていった。

また 1944 年には、最初の除草剤となる 2,4-D（2,4-ジクロロフェノキシ酢酸）が米国で開発された。除草の手段が省力化できることは、農業の労働生産性上重要な意義があり、農業生産者の間では急速に広まっていくこととなった。それ以降、さまざまな機能を持った除草剤が開発され、現在に至っている。

近年の動向～遺伝子組み換え種子による農薬の代替

農薬の使用量は、世界の農業生産拡大とともに急増していったが、人体に対して毒性を持つものもあることから、農業従事者の健康被害や農作物の残留農薬問題、環境汚染などが問題視されるようになってきた。そうした問題への対応策として農薬メーカーがたどりついた技術が「遺伝子組換え技術」であった。遺伝子組換え技術を使うことによって、病害虫への耐性を持った品種を開発したり、特定の除草剤に対する耐性を持たせるなどの機能を組み込むことが可能になった。

近年では、そうした農薬類似の機能を備えた品種の種

子と、それを栽培するノウハウの提供を組み合わせたパッケージ型の商品は「農業バイテク商品」と呼ばれ、農業関連市場の重要な構成要素となっている。2007 年から 2011 年までの市場規模の推移（図表 5）を見ると、農業

市場の伸びが約 3 割にとどまっているのに対し、農業バイテク製品の売上高は約 2.2 倍に急伸し、農業関連市場の 2 割を超える規模にまで拡大してきている。

3. 農業関連技術

前節で見た農業資材技術が農業分野において開発されたものであるのに対して、土木や機械、情報の技術は、さまざまな分野で活用されている技術を農業にも導入したものである。これらは今日の農業生産において重要な役割を担う技術でもある。

（1）土木技術

農業分野での土木技術は、開墾や灌漑（含む排水）などによる、農地の開拓や、既耕地の生産性の向上のために用いられ、大学に農業土木学の講座が設けられたのは、1876 年にドイツのボン大学におけるものが嚆矢とされている。

開墾には山林を切り開く開拓や、沼地や湿地などを転換する干拓がある。また、灌漑とは農業生産のために外部から人工的に水を供給、あるいは排水することをいい、河川などの水源から農地まで水を運ぶための用水路の建設や、水源を確保するための溜池やダム建設、地下水を利用するためのポンプ、くみ上げ設備の設置等、広範に及ぶ。

世界で初めて土木技術を用いて灌漑設備が建設されたのは BC6000 年頃の南西アジアであったと考えられている。灌漑技術の導入は収穫量の増加と安定をもたらし、南西アジアからチグリス、ユーフラテス川流域へ、さらにはナイル川やインダス川にも伝播していった。ダムの歴史は BC2750 年にエジプトで造られたサド・エル・カファラダムが最古のものとされているが、このダムは上水道として人や家畜へ水を供給する目的で建設されたものであり、農業用ダムとしては BC1800 年頃に同じエジプトで造られたものが嚆矢とされるが、いずれも現存していない。

開墾は農耕が開始された当初から行われていたが、欧州においては 11 世紀から 13 世紀にかけて「大開墾時代」とも呼ばれ、広大な森林の伐採や湿地の埋め立てが大規模に進められた。

干拓事業で有名なものとして、1612 年にオランダで行

われた、海抜マイナス 3.5m の内海地域を 42 基の風車の動力を用いて干拓したベームスター干拓地がある。オランダ最古の堤防は既にローマ帝国時代に建造されていたが、大々的な事業としてはこのベームスター干拓が有名である。海岸沿いの湿地や泥炭地や干潟を埋め立てたものであり、長方形の格子で区画整理され、耕地として貸し付けられたり、牧畜業者に利用されたりした。以来オランダでは堤防に囲まれ風車・排水路・水門で雨水や地下水を排水する干拓地が広がっていった。

（2）機械技術

農業機械とは一般に農作業で利用する機械全体を指すが、大きくは人力、畜力によって作動する「農具」と内燃機関や電気を動力とする「農業機械」とに分類される。次ページ図表 6 は、農業生産の工程ごとに使用される農業機械をまとめたものである。各工程において、多くの機械が利用されているが、北南米のような大規模な農地と日本のような小規模な農地とでは、同じ機械でもサイズなどが全く異なる場合が多い。

農耕初期の段階では、人々は木の棒や板などを使って土を耕していたが、ローマ時代には土を掘る刃と横に跳ね上げる板からなる木製の鋤（すき、プラウ）が開発され、作業効率は大幅に向上した。また、こうした起耕用の農具は蓄力と組み合わせでも使用された。家畜を利用する農具は、先進国でも蒸気機関が開発される 19 世紀まで長い間使われ、機械を導入するだけの経済力を持たない途上国では現在でも利用されている。

1837 年に米国のディーサー社が鋼鉄製のプラウを開発すると、米国内の農場で急速に普及し、後にはプラウを 2 連～4 連にした複式プラウも登場してくる。米国や英国では、蒸気機関を起耕用の耕運機に利用する試みも行われていたが、機関の重量によって耕した土がかえって踏み固められてしまうことから、広く普及することはなかった。機械を動力とする耕運機が広く用いられるようになったの

図表 6 工程別の農業機械一覧

整地・起耕	プラウ、ロータリ、サブソイラ（心土破砕機）、ローラー、ディスクハロー（採土機）、代かき機、鎮圧機、均平機、うね立機、みぞ切り機、抜根機、みぞ掘り機、穴掘機
施肥	肥料散布機、ブロードキャスト
播種	プランタ（点播機）、施肥播種機、田植機、野菜移植機、散播機
生長管理（防除、追肥は施肥に同じ）	噴霧機、散粉機、スピードスプレーヤ、ミスト機、散粒機、土壌消毒機、煙霧機、航空散布機ヘリコプター（航空防除）、刈払機、凍霜害防除機、中耕除草機、間引機
収穫	バインダ、脱穀機、収穫機、コンバイン、馬鈴薯堀取機、馬鈴薯収穫機、モア、ヘイベアラ、ロールベアラ、たまねぎ堀取り機、摘採機、各種ハーベスタ、振動収穫機、摘花機、乾燥機、籾すり機、選別機、野菜洗浄機、野菜結束包装機、精米機、製麦機、製粉機

は、1889 年の米国のケース社などによってガソリンエンジンを使ったトラクタが開発されてからのことである。

作物を刈り取る刈取機では 1826 年に英国の P. ベルがハサミの原理を使った刈取機を発明したが普及には至らなかった。最初に普及したのは 1833 年に米国の C. マコーミックが発明した刈取機であった。それは馬に牽引させて使うものであったが、刈り取られた穂が自動的にそろえられ、そのまま後ろに放り出されるという画期的な機能を有していた。

脱穀機では、1786 年に水車を動力源とした脱穀機が英国で発明されている。1849 年には米国の A.L. アーチャンボルトが脱穀機に動力を供給する「農用蒸気機関車」を開発した。

農業機械の歴史上、画期的な発明とされるのが刈り取りと脱穀が同時にできるコンバインの登場である。1841 年に米国の H. ムーアによって特許が取得され、中西部で普及し始め、カリフォルニア州へも広がっていった。この頃のコンバインは馬などの家畜に引かせて動かし、前進する車輪の回転力を機械部分の動力源として利用する構造であった。蒸気機関を利用したコンバインも 1880 年代

には登場したが、こちらも先述の耕運機と同様、広くは普及しなかった。ガソリンエンジンを利用したものが登場し、普及するのは 20 世紀に入ってからのことである。

米国では、こうした農業機械を導入することで農業の生産性を高め、欧州向けに安価で良質な農産物をより大量に輸出するようになっていった。

（3）情報技術（IT）

近年、飛躍的な進歩を遂げた情報技術は、さまざまな産業に導入され、大きな影響を与えている。その流れは農業においても例外ではない。農業分野における IT の導入は、生産のみならず、育種や農薬などの開発や物流、販売面まで広範囲に及んでいる。

ただし IT は、前述の土木や機械と異なり、近年になって導入が本格化した技術領域である。現時点では、農業分野においても、それを活用する方策は発展途上にあり、広く普及する段階には至っていない。農業分野における IT の活用は、近年の農業技術の動向を紹介する次章で取り上げることとしたい。

Ⅲ．近年の農業技術動向

ここでは、近年注目されている技術として、「DNA マーカー育種」、「精密農業」、「植物工場」の 3 つを紹介する。DNA マーカー育種は遺伝子の情報を活用した新しい育種技術として研究が進んでいる。また、植物工場や

精密農業は、栽培技術における環境変化対応から環境制御への潮流を端的に表わす事例である。そして、これら 3 つはいずれも、農業分野への IT 導入の先端的な事例でもある。

1. DNA マーカー育種

農作物の育種には多大な時間と労力を要するが、2000 年以降、さまざまな生物で解読が進められているゲノム（遺伝情報）を用いることで効率的な品種開発を可能とする DNA マーカー育種が導入されてきている。その過程では、

IT の進歩によって超高速のゲノム解読装置の開発が進むなど、周辺技術の進歩も追い風になった。

DNA マーカー育種は「遺伝子の情報を利用」するものであり、遺伝子組換えのように「遺伝子を直接操作」

DNA マーカー育種の具体例

DNA マーカー育種の具体的な進め方を、いもち病 に強いイネの新品種を作るケースを例として見てみよう。DNA マーカー育種と従来の育種の手順をまとめた図表 7 を見ると、③の選抜段階において、従来育種では実際に多くのサンプルを栽培し、いもち病^注に強いかどうかの確認を行い、見た目や味覚についてはイネを成熟させてから選抜しなくてはならないが、DNA マーカー育種では幼苗時点で良いものだけを選抜して栽培できるため、試験栽培の規模や時間、労力など、多くの点で効率的な開発ができる。さらに、DNA マーカーを目印とすることで、育種家の経験や勘に頼ることなく、確実に安定した選抜が可能になる。また、④の育成段階において、DNA マーカー育種では完成した新品種が親品種と同じ遺伝子を持っていることを確実に判断でき、いもち病に強い遺伝子を含むゲノム領域をできる限り絞り込むこともできる。

注 いもち病（稲熱病）とはイネに発生する病気の一つで、胞子によって広がり、大幅な減収と食味の低下をもたらすもの。

図表 7 DNA マーカー育種と従来育種との比較の例

DNA マーカー育種	従来育種
① DNA マーカーの開発 親品種について、耐病性品種と区別するための DNA マーカーを多数探す。一方、いもち病に強い品種（耐病性品種）について、いもち病に強い遺伝子を確認するための DNA マーカーを探す。	
①交雑 それぞれの DNA マーカーを見つけた上で、従来育種と同様に、親品種に耐病性品種を 1 回交雑して、親品種と耐病性品種の両方の形質を持つ子（F1）を作る。この F1 はいもち病に強い遺伝子以外にも耐病性品種から望ましくない遺伝子を受け継いでいる状態。	①交雑 親品種に耐病性品種を 1 回交雑して、親品種と耐病性品種の両方の形質を持つ子（F1）を作る。この F1 はいもち病に強い遺伝子以外にも耐病性品種から望ましくない遺伝子を受け継いでいる状態。
②戻し交雑 このため、②でできた F1 と親品種を再度交雑する（戻し交雑）。この結果、さまざまな遺伝子を持つ多くの種類の孫を作る。	②戻し交雑 このため、①でできた F1 と親品種を再度交雑する（戻し交雑）。この結果、さまざまな遺伝子を持つ多くの種類の孫を作る。
③選抜 ③で作られた多くの種類の孫の種をまき、幼苗まで育てた上で、その幼苗から DNA を抽出する。この DNA を調べて、DNA マーカーを目印に、いもち病に強い遺伝子を持ち、なおかつ、親品種の遺伝子をより多く受け継いでいる個体を選抜して育てる。	③選抜 ②で作られた多くの種類の孫の種をまき、生長過程でいもち病に強い個体を選抜する。さらに、イネを成熟させてから見た目や味覚試験の結果をもとに、親品種の特徴をできるだけ多く持つものを選抜する。
④育成 ④で選抜した孫と親品種を交雑して、④と同様に DNA マーカーによる選抜を行う。これを繰り返すことで（通常さらに 1～2 回繰り返す）、いもち病に強い遺伝子以外は親品種と同じ新品種が育成される。	④育成 ③で選抜した孫と親品種を再度交雑する。このような戻し交雑と選抜を繰り返すことで、いもち病に強い形質以外は親品種と同じ新品種が育成される。ただし、見かけ上では親品種と同等であっても、育成された品種には耐病性品種の遺伝子を持つ領域が多く残っている。

出所：農林水産省 「ゲノム情報の品種改良への利用－DNA マーカー育種－」を参考に三井物産戦略研究所作成

するものではない。品種開発自体は、あくまで従来同様の交配技術を使って行われるため、遺伝子組換え技術によって作り出された作物とは全く別のものである。

従来の育種技術では、例えば食味が良いものと病気に強いものを掛け合わせるなど、優良な特性を持つもの同士を交配して、両方の良い特性を持つ新品種を開発するが、どれを組み合わせたらよいかは研究機関や育種家の経験に頼る部分が大きく、多大な時間と相当数のサンプルを作る手間とが必要であった。それに対して DNA マーカー育種では、既に解読済みの作物のゲノムの中から優良な特性を発揮する遺伝子を見つけ出し、この遺伝子がうまく親から子へ引き継がれるように DNA 配列の並びを目印（マーカー）として交配作業を進めていくことで、サンプル数を絞り込み、効率よく開発を進めることができる。さらに、交配したサンプルの DNA 情報を読み取ることによって、その特性がうまく子に引き継がれたかが判別できるので、優良品種選抜のためにサンプルの生育を待つ時間が短縮でき、品種開発の効率を高めることも可能である。例えば、イネの場合だと 15 年かかっていたものが 3～5 年と、短期間での育種が可能になる。

日本においては、2008 年から 2013 年の 5 年間にわたって、農林水産省が「新農業展開ゲノムプロジェクト」を進めてきた。同プロジェクトでは、2004 年に解読されたイネのゲノムを活用してイネの新品種を実際に作り出し、ゲノム育種の実用性を明らかにした。加えて、この間に 35 の重要遺伝子の特許化するなどの成果も残している。政府レベルでの同様のプロジェクトは多くの国で進められており、日本のプロジェクトの予算が年間約 30 億円（2011 年度）程度であったのに対して、米国の品種開発プロジェクトでは年間約 300 億円、中国の国家組換え育種重大プロジェクトでは 2008 年からの 12 年間で約 3,000 億円と、より巨額の資金を投入してきている。

DNA マーカー育種を行う上で重要な役割を担うのがゲノムである。世界各国で、作物や家畜を含む多くの生物のゲノムの解読が進められ、国家間の開発競争が激化してきている。その一方で、各国の研究機関が共同でゲノムの解読を進めるケースもある。そうした動きによって、今後も多くの生物のゲノムの解読が進められることは確実に、それらを活用した DNA マーカー育種の技術は、今後一段と有用性、重要性を増していくものと考えられる。

2. 精密農業

精密農業 (Precision Agriculture) は精密農法 (Precision Farming) とも呼ばれ、1990 年代に初めて提唱された、栽培における比較的新しい技術として注目されている。精密農業は欧米を中心として開発された技術であるため、主に大規模型の農業を対象に広まってきた。精密農業の定義は国際的にいくつか存在しているが、東京農工大学の澁澤栄教授は、それらに共通する要素を取って「複雑で多様なばらつきのある農場に対し、事実を記録し、その記録に基づくきめ細やかなばらつき管理を行い、収量、品質の向上及び環境負荷低減を総合的に達成しようという農場管理手法」と定義している。

具体的には、まず、圃場内の各区画間のばらつきを詳細に記録する。土壌環境や雑草、病害虫の局所的な発生状況、生育むらなどを走行式土壌センサーやリモートセンシング技術などを用いて詳細に観測して記録する。次に、過去から蓄積したデータなどを参照して、圃場内のばらつきに対して均一な生育状態となるように栽培方法や作業内容を決定する。例えば、肥沃度が十分な土壌に追加的に施肥したり、雑草のない区画に除草剤を散布したりする必要はない。収穫の工程では農産物の収量と品質のばらつきの観測をするため、収量モニタ付き収穫機によって作業しながら区画ごとの収量状況を把握し、収量マップを作成する。

これらの工程を実践するためには、「圃場マッピング技術」、「意思決定支援システム」、「可変作業技術」の3つの要素技術が必要となる。「圃場マッピング技術」とは、

人工衛星のリモートセンシング技術を利用して光学的に圃場内の作物の生育状況をとらえ、さらに地上では GPS と土壌センサーを使い、それらの情報を集約し、どの場所の生育が悪いのか、どこかの土壌に水分が少ないとか、肥料が少ないなどといった具合にきめ細かく状況把握するものである。土壌センサーは圃場内の土壌特性や作物の生長を定量的に計測、記録するのに使われ、土の成分や硬さ、酸性度などを測定し、記録する (図表 8)。

「リモートセンシング」とは、従来、生産者が目視で行ってきた作物の生育判断を定量的に把握するため、人工衛星などに搭載されたセンサーによって、地表にある植物の状態を調査する手法である。植物が生育の状態によって、光の反射率を変化させる特性を利用して、衛星から反射率の変化を見ることで植物の生育状態を判定することができる。

「意思決定支援システム」とは、最適な制御を行うための情報解析とそれに基づく制御の方針を定める技術である。圃場マッピングで把握した状況を、過去に蓄積したデータと照らして水や肥料の散布量など作業内容を決定するものである。

「可変作業技術」とは、意思決定支援システムにより決定した作業内容を実行に移すため、局所的に必要な追肥や防除などの作業を行い、ばらつきをなくす技術である。そのツールとしては、肥料や農薬散布機などに GPS を搭載して自機の位置を把握し、圃場マッピングのデータと連動することによって、区画に肥料や薬剤の投入量を調整することができる「可変作業機」と呼ばれる機械が使われる。

また、収穫の際に利用されるのが、収量モニタ付きの作業機器である。農作物を収穫する際に、収穫機に取り付けられたセンサーで収量をモニタリングし、それによって得られた情報を蓄積する。そのデータと圃場内の地理データとを解析することによって、圃場内の収穫高のばらつきを分析し、翌期以降の作業に活用する (図表 9)。

米国ではディーアール社や AGCO 社などの大手農業機械メーカーが精密農業に用いる機器を提供している。精密農業の導入率を見ると、2008 年時点で中西部のコーンベルトでは収量モニタ付きコンバインでの収量計測が 16%、土壌分析が 26%、人工衛星リモートセンサー 5%、可変施肥 24%、可変農薬散布 19% という調査結果がある。

図表 8 圃場マッピングの例



出所：農林水産省農林水産技術会議 HP より引用
http://www.s.affrc.go.jp/docs/report/report24/no24_p5.htm

図表 9 収量モニタつき作業機器の例



出所：図表 8 と同じ

経営規模が大きければ大きいほど精密農業を取り入れることによる肥料や農薬の節約の度合いも大きく、収益性が向上することから、精密農業は経営効率改善の有力な手段として導入が進んでいる。また、米国の農業では水が貴重な資源であるため、水に対しても、精密灌漑 (Precision Irrigation) と呼ばれる技術の研究も行われており、精密農業の重要な課題となっている。また、GPS が高機能化することによって、トラクタ自体が自動操縦化されるような技術も進んできている。

精密農業に関わる要素技術をパッケージ化し、リモートセンシングや土壌・作物のデータを一括して圃場空間情報にまとめ、ウェブサイトを通じてワンストップのサービスを提供するビジネスモデルも登場している (図表 11)。インターネットを利用して情報を発信することで、農業生産者

のみならず、農業コンサルタントや販売代理店、あるいはリスクビジネスの保険や金融機関なども顧客として想定されている。大手種子企業であるモンサント社も、精密農業への取り組みを中期戦略の柱の一つに上げている。

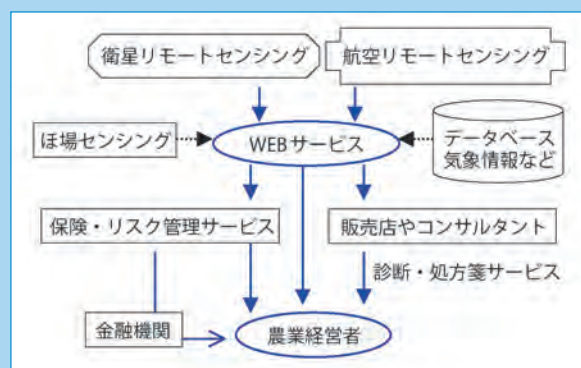
精密農業について米国以外の地域での動きを見ると、欧州では、数値データはないが、傾向としては大規模農場ほど導入が進んでいるとされている。米国の精密農業の主な目的が収益性の向上であるのに対して、欧州では主として肥料や農薬を必要以上に使用することを防ぐことで環境を保全することが目的とされている。一方、アジアを見ると、韓国や中国では、日本と同様に 1990 年代後半から精密農業の研究が行われている。可変施肥機、収量モニタ付きコンバイン、リモートセンシングなどの研究が国家プロジェクトとして行なわれ、実際に営農している農場での活用方法の研究が進められている。また、マレーシアでは大資本によるプランテーションが多いため、比較的早い時期からリモートセンシングを中心とした精密農業が取り入れられている。

図表 10 自動操縦機器の例



出所：TeeJet Technologies HP より引用
<http://www.teejet.com/english/home/products/precision-farming-products/gps-guidance.aspx>

図表 11 WEB サービスを軸にした精密農業技術のパッケージ例



出所：「第 5 世代の精密農業」澁澤栄 (「特技懇」2010. 1. 29 no. 256) より引用

3. 植物工場

植物工場とは、高辻正基著『図解よくわかる植物工場』によると、「野菜や苗を中心とした作物を施設内でひかり、温湿度、二酸化炭素濃度、培養液などの環境条件を人工的に制御し、季節や場所にあまりとらわれずに自動的に連続生産するシステム」とされている。植物工場は大

別すると、光源に太陽光を使う「太陽光利用型」と人工光を光源とする「完全制御型」、両方を併用する方法の 3 つに分類できる。これらの植物工場では、太陽光利用型で太陽光を利用する以外、人工的に管理された環境下の隔離された空間で生産されるため、生産性の向上と

安定化、作業の省力化、清潔な栽培環境といった長所があり、工場内で生産された作物は無農薬あるいは低農薬で、新鮮、清潔、付加価値が高いなどの特徴を持っている。

農業生産では主流である露地栽培は、天候や土壤などの自然環境の影響を直接受けるため、生産が不安定である。この不安定要素を回避すべく登場した技術が「施設園芸栽培」であり、野菜や花の端境期をなくして周年的な供給を可能にした。続いて、植物の成長に大きな影響を与える土壤環境を制御するための技術として「水耕栽培」が開発された。水耕栽培は土の代わりに肥料などを配合した培養液を使用し、作物の生育に最適な養分を最適なタイミングで与える栽培技術であり、土壌栽培で発生する連作障害が起きないという特徴を持つ。こうした展開を経て登場したのが植物工場である。

世界初の植物工場と位置付けられているのは、1957年にデンマークのクリステンセン農場に設置された施設である。建物は、長さ90m（栽培長70m）、幅12mのガラス温室で、カーセと呼ばれる小葉菜類を生産していた。トレイ上で栽培し、1日きざみの6段階で栽培管理を行い、6日程度で収穫、パックされて出荷していた。太陽光利用型であったが、冬季はナトリウムランプで補光していた。現在日本国内で行われているカイワレ生産は、この工場のスタイルを原型としている。

その後、太陽光利用型では、1970年代に米国のホイッティカー社がカリフォルニアに約3,000坪の温室を建設し、リーフレタスと中国野菜を週1万5,000個生産した。また、同時期には、日本でカイワレ大根の商用生産が開始されるようになった。近年では、オランダにおける取り組みが目立っている。天井高の高い大型の連棟式ガラスハウスを使って、コンピュータ管理化と自動化を進めた栽培技術の導入が進められており、同国の農業は、花卉や野菜の園芸栽培では世界でトップクラスの技術力を有していると考えられている。

一方、完全制御型では、1970年代から80年代前半にかけて、オーストリアのルスナー社が高さ53mのタワー温室をウィーン郊外に建設したり、米国ではゼネラル・エレクトリック社が光源に高圧ナトリウムランプを使用した植物工場を開発し、トマトやキュウリなどの栽培も試みていた。同じく米国で、食品会社のゼネラルミルズ社（後にファイトファーム社）とゼネラルフーズ社が大型の完全制御型植物工場の実用化を目指し、シカゴ郊外に建屋面積約

9,000 m²の2階建て工場を建設した。

日本では、植物工場というと完全制御型をイメージするケースが多いが、欧州を中心に世界的には、完全制御型よりも太陽光利用型の開発が進められている。日本という植物工場は「plant factory」と英語表記されるが、この言葉は欧米では一般的ではなく、米国では完全人工光型植物工場は「vertical farming」という用語で表現されているし、欧米では太陽光利用型もしくは併用型工場を「greenhouse」と、日本でいう一般的な施設園芸とは区別されていない。

日本においては、1980年代中頃に日立がつくば万博で回転式レタス生産工場を紹介したり、ダイエーが千葉県県のショッピングセンターで「バイオフィーム」と呼んだ店舗型植物工場を作ったりしたことで、植物工場が一種のブームとなった。その後、1990年代にキュービーが農水省の補助金を受けて植物工場を作り、野菜販売を始めた第二次ブームを経て、近年、第三次ブームとも呼べるような状況が生じている。これは、2009年に経産省と農水省が共同で「農商工連携研究会植物工場ワーキンググループ」を立ち上げ、「新経済成長戦略」に基づいた国の支援策として補正予算が組まれたことが契機となっている。異常気象による不作の頻発や、消費者の安全・安心志向の高まりを受けて、それらへの対応として、完全制御型植物工場が注目されるようになった面もある。

ただし、実際に植物工場を運営する法人の6割が赤字との調査結果もあり、ビジネスとしての継続性には疑問が残る。事業化に向けた最大の課題が生産コストの高さである。植物工場は、建屋建設や生産設備などの初期投資コストが大きいことに加え、照明や空調などのランニングコストも大きな負担となる。一般に、完全制御型の植物工場産の農産物は露地栽培や施設栽培産と比較し、原価が3～5割ほど高いといわれているが、従来の生産技術で作られる商品との差別化は難しく、同価格帯で売られるケースが多い。光源のLED化によるコスト削減や、地熱を利用した空調費低減など、研究が進んでいるものの、抜本的な解決策には至っていない。また、現在の植物工場では、レタスやサラダ菜、ハーブなどの葉もの野菜やトマト、キノコなど、栽培品目が限定的な点も課題となっている。

これらの課題を克服するための研究は活発化してきており、例えば、栽培品目を増やすための研究として、大根などの根菜の栽培や、東海大学によるコシヒカリの工場

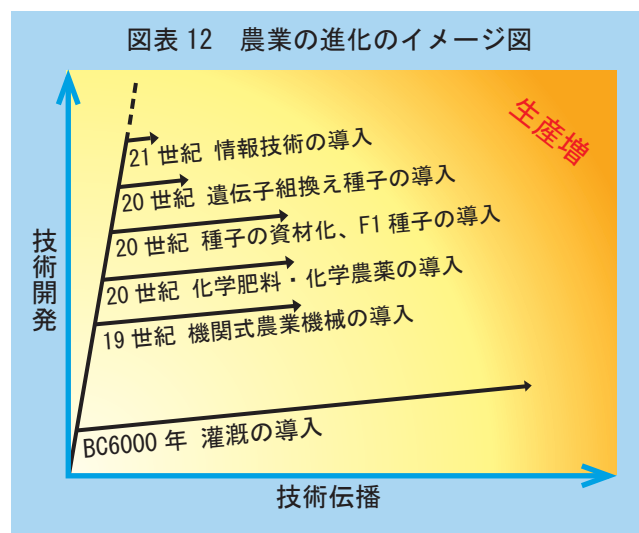
生産実験などが知られている。また、販売価格が高く設定できるような高付加価値商品を開発する研究も行われている。独立行政法人産業技術総合研究所では、完全

制御型のメリットを活かして、遺伝子組換えイチゴの果実を原料としたイヌの歯肉炎軽減剤の研究開発を行っている。

おわりに

農業というと、ローテクというイメージで見られがちだが、ここで紹介したように、遺伝子技術や、センサー、衛星を用いた IT などの新しい技術の導入が急速に進みつつある。とはいえ、世界の農業の全容を見ると、そうした先端的な技術はもちろん、土木や機械、肥料や農薬の工業生産といった、先進国では当たり前になっている既存技術でさえ、普及が進んでいない地域も多い。世界の農業の発展に向けては、先端的な技術の開発のみならず、既存の技術を広く伝播させていくことも重要な方向性となる（図表 12）。

また本稿では、収穫までを農耕のプロセスとして整理したが、その後の工程である輸送やマーケティング、販売等に関する技術も、産業としての農業にとって大きな役割を担っている。これら、本稿で取り上げなかった視点、分野も含めて、これからの世界の農業の進化においては、技術面の展開が引き続き重要なファクターとなるだろう。



【参考文献】

- ・森田茂紀，阿部淳，大門弘幸．栽培学－環境と持続的農業－．朝倉書店，2006
- ・吉岡宏．今や国際標準の「野菜接ぎ木技術」．AFC フォーラム．日本政策金融公庫．2013 年 10 月号
- ・鶴飼保雄．植物改良への挑戦－メンデルの法則から遺伝子組換えまで．培風館，2005
- ・世界大百科事典，第 24 巻（肥料の項）．平凡社
- ・大山卓爾．肥料学再考．日本農学アカデミー．第 14 号（2010 年 12 月発行）
- ・日本土壌肥料学雑誌．第 78 巻第 1 号
- ・高橋英一．歴史の中の肥料．農業と科学．2003．第 538-544 号
- ・東京工業大学 HP 研究成果詳細 <http://www.hyoka.koho.titech.ac.jp/eprd/recently/research/research.php?id=306>
- ・農薬ネット．<http://nouyaku.net/tishiki/REKISHI/REKI1.html>
- ・武田邦彦中部大学教授 HP．http://takedanet.com/2007/04/post_2c47.html
- ・オランダ政府観光局発行パンフレット
- ・一般社団法人全国農業改良普及支援協会，株式会社クボタ．「みんなの農業広場」．<http://www.jeinou.com/>
- ・国立国会図書館．「博覧会 近代技術の展示場」．<http://www.ndl.go.jp/exposition/s2/9.html>
- ・坂井洲二．水車・風車・機関車－機械文明発生の歴史．法政大学出版局．2006
- ・農林水産省．ゲノム情報の品種改良への利用－DNA マーカー育種－．http://www.s.affrc.go.jp/docs/report/report21/no21_p1.htm
- ・農林水産省．「ゲノム情報を活用した作物の新品種開発の最前線」研究成果集
- ・澁澤栄．第 5 世代の精密農業．特技懇．特許庁技術懇話会．2010.1.29.no.256
- ・農林水産省．日本型精密農業を目指した技術開発．http://www.s.affrc.go.jp/docs/report/report24/no24_p1.htm
- ・梅田幹雄．“世界の精密農業事情と今後の展望”．担い手を支える精密農業と農業機械．独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構生物系特定産業技術研究支援センター，新農業機械実用化促進株式会社．2008．http://www.shinnouki.co.jp/report/doc/h19new_tech_seminar.pdf
- ・高辻正基．図解よくわかる植物工場．日刊工業新聞社．2010
- ・伊藤保，藤本真狩，中村謙治．特集，植物工場ビジネスを追う．AFC フォーラム．日本政策金融公庫．2012 年 4 月号