

わが国における遺伝子組換え作物開発の現状と今後の課題

(独) 農業・食品産業技術総合研究機構作物研究所

大島 正弘・廣瀬 咲子・川岸 万紀子・川口 健太郎・安倍 史高・藤郷 誠・西澤 けいと

はじめに

農業技術の中で今最も先端の技術といえば、それは遺伝子工学を用いた遺伝子組換え作物の開発であろう。1953年にワトソン・クリックにより遺伝物質としてのDNAの重要性が発見されて以来、分子生物学の進歩は急速であり、その応用技術の一つとして現在世界には1億数千万ヘクタールに栽培される大豆やトウモロコシを始めとする遺伝子組換え作物が実用化されている。一方、わが国では遺伝子組換えに関する研究は早くから着手されており、実用化を目指した品種の開発も進んでいたが、バラやカーネーションを除いて主要な作物種においてまだ遺伝子組換え作物は実用化されていないのが現状である。

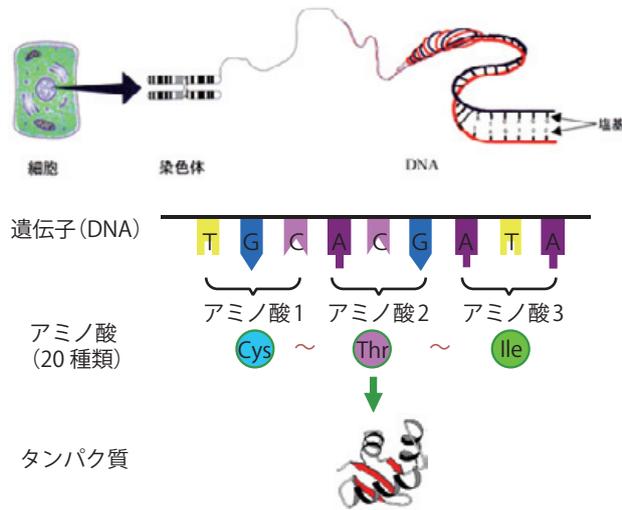
本稿では始めに遺伝子組換え技術はどのような技術なのか、遺伝子組換え作物とはどのような作物なのかを易しく解説する。次に今消費者の最も関心のあるトピックである遺伝子組換え作物の安全性について、遺伝子組換え作物とこれまでの作物との違い、安全性の考え方、安全性評価の方法について分かりやすく解説する。そして、わが国の水稲、花き、小麦、大豆などの遺伝子組換え技術の現状と問題点について、遺伝子組換え技術の必要性に力点を置きつつ紹介する。最後の部分は若干専門的な用語も入るが、我慢しておつきあい願いたい。

1. 遺伝子組換え作物とは

遺伝子はしばしば生物の設計図に例えられる。地球上のすべての生物は遺伝子の情報により形作られ(これを形質という)、その遺伝子はDNA(デオキシリボ核酸)という物質でできている。DNAはA(アデニン)、T(チミン)、G(グアニン)、C(シトシン)という4種類の塩

基がいろいろな組合せでつながったもので、このうちの3文字の並び順を変えることによって何通りもの「暗号」ができる。この3文字の組合せが1つ1つのアミノ酸に対応しており、それによって長いDNAの鎖の中にアミノ酸の配列、すなわち私たち生物の形を作るタンパク質の設計図が書き込まれている。地球上のすべての生物は共通してこのようなDNAの中に暗号化された遺伝情報に基づいて生まれ、成長し、増殖して、死んでいく。このDNAの長い鎖は細かく折りたたまれ、染色体と呼ばれる構造をとり、生物を構成する1つ1つの細胞の中に収まっている。そして、卵子や精子を通じて遺伝情報を子孫に伝える役割を果たしているのもこのDNAである。親から子へ遺伝情報が伝えられる場合には卵子と精子の遺伝子が対になり、両親の遺伝情報が複雑に組み合わせられて子へ伝わる。

作物の品種改良とは、この遺伝の性質を利用し、交配を行ってより良い品種を育成することである。たとえば、味はおいしいが病気に弱い水稲の品種を病気に強く改良するためには、味はまずくても病気に強い水稲の品種と交配する。その子孫には味がまずくても病気に弱い個体や、おいしくて病気に強い個体などいろいろな形質をもった多数の個体が現れる。この子孫の中から目的にあった個体を選び、病気に強くてもおいしい米の品種を育成する。したがって、目的にかなった品種を作るまでには最低でも10年あるいはそれ以上の年月を要する。しかし、最近では遺伝子マーカー育種という技術が発達し、育種の期間がかなり短縮され、しかも選抜が正確になった。病気に強い遺伝子のマーカー(目印となるDNA配列)があれば、交配して得られた多数の種子をまいた後、すべてを大きく育てて病原菌を接種して病気に強いかどうかを観察する必要はなく、苗の時期に遺伝子マーカーが含まれているかどうかを調べればよ



DNAの2本の鎖が塩基を挟んでほしご状になりさらに折りたたまれている。
塩基の並び順の情報に従い、(正確にはRNAという核酸を介して)アミノ酸、そしてタンパク質が合成される。

いので、一度により多数の検定が可能になるというわけである。いずれにしても、交配による品種改良では望ましい形質と望ましくない形質が子孫の中に混じっているため、望ましい形質を持つ個体の選抜には相当の時間と労力を必要とする。

これに対し、遺伝子組換え技術はこれまでの交配を中心とする品種改良では実現できなかったような新しい形質を用いることのできる画期的な技術である。たとえば、大豆の栽培では雑草が問題になるが、除草剤を散布しても枯れない除草剤抵抗性的大豆を微生物の遺伝子を導入して新たに開発することに成功し、現在世界で広く利用されている。

では、この画期的な技術である遺伝子組換えとはどんな方法なのであろうか？以下にその方法の概略を紹介する。DNAの長い鎖の中で特定の配列(GGATCCなど)を見つけてそこで切る「はさみ」のような働きをもつ酵素が微生物から何種類も見つかっている。さらに切り口の形状が同じDNAどうしをつなぎ合わせる「のり」のような働き酵素も見つかっており、これらを使って私たちは生物の遺伝子を自在に切ったりつないだりすることができるようになった。

実際の遺伝子は、遺伝子がいつ、どこで働くかを調節するプロモーターと呼ばれる部分、タンパク質を構成するアミノ酸の暗号が書かれている部分、遺伝子情報の解読を終結させるターミネーターと呼ばれる部分の3つの部分から構成されている。これらの3つの部分を改良

したい形質が十分発揮できるように「切り貼り」して組合せて、プラスミドと呼ばれる染色体よりもはるかに小さな環状のDNAにさらに「切り貼り」して入れる。そして、このプラスミドを目的とする作物の染色体の遺伝子の中に組込む。作物の中に組込む代表的な方法がアグロバクテリウム法である。もともと自然界にはプラスミドを使って植物に遺伝子導入をしている細菌がいる。植物に瘤を作るアグロバクテリウムという細菌もその一つで、植物の遺伝子中に自分のDNAを組込ませる仕組みを持っている。そこで、アグロバクテリウムのプラスミドに目的とする遺伝子の3つの部分を組込んでアグロバクテリウムの中にもどし、その仕組みをうまく利用して作物の遺伝子の中へ目的の遺伝子を導入するのである。その後は遺伝子が導入された個体を選抜するという手順であるが、実際は作物の種類、さらには品種によっても遺伝子導入が困難な場合があり、現在、それぞれの作物でさらに研究や技術開発が進められている。

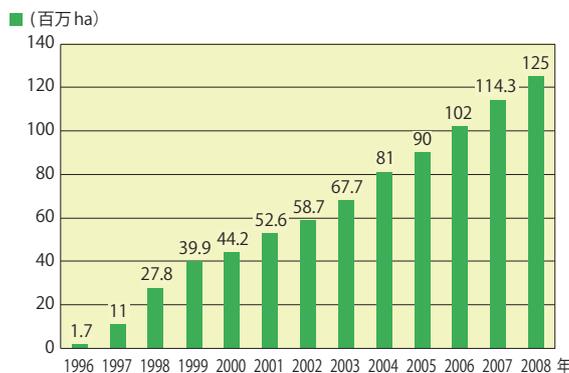
遺伝子組換えの利点はその生物種が持っていない遺伝子でも単独で導入することができる点である。バラには青い色を作る遺伝子がもともと備わっていない。そこで、青い色を作る遺伝子をパンジーから取り出して遺伝子導入して育成されたのが、青いバラ「アプローズ」(花言葉; 夢かなう)である。また、日本国民に多いスギ花粉症を緩和するため、スギ花粉のアレルゲンタンパク質遺伝子の一部を取り出し改良して、スギ花粉に体が慣れて花粉

症が軽くなるようなタンパク質を米の中に作る「スギ花粉症緩和米」の開発研究も行われている。この2例は日本で研究された遺伝子組換え作物であり、青いバラについては今年日本初の商業栽培が始まったばかりである。

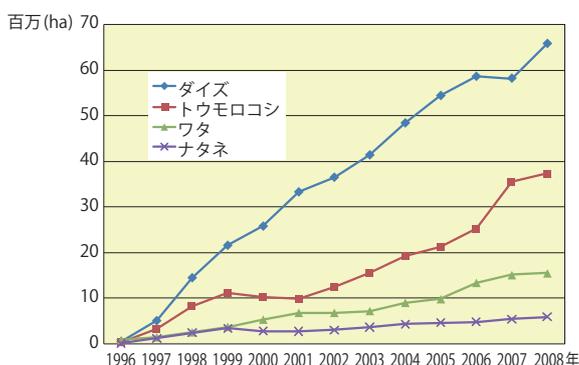
世界に目を向けて過去を振り返ると、1994年に遺伝子組換え作物としてはじめて日持ちの良いトマト「フレーバー・セーバー・トマト」が発表されて以来、さまざまな作物が開発・実用化されてきた。主な例をあげると、害虫抵抗性のトウモロコシとワタ、除草剤抵抗性の大豆、ウイルス病に抵抗性のパパイヤ、色変わりのカーネーション、オレイン酸を多く含む大豆など、作物の種類、導入された形質もさまざまである。

2. 世界における遺伝子組換え作物栽培の現状

商業栽培については1996年にアメリカで大豆の栽培が始められて以降年々増加してきた。2008年現在、全世界の大豆作付け面積の70%、トウモロコシで24%、ワタで46%、カノーラ（油料用ナタネ）で20%が遺伝子組換え作物である（ISAAA；国際アグリ事業団調査）。食生活が変化し、肉類の消費が増えたため、飼料用穀物の需要が高まったことによって大規模な穀物生産における省コスト化を進めることが必要になった。そこでこの目的に合った除草剤抵抗性大豆、害虫抵抗性トウモロコシの栽培面積が増加することとなった。これらの遺伝子組換え作物はアメリカを初め、中国やインド、ブラジル、カナダなど各国へ普及が進み、2006年時点で22カ国で約1億200万haに栽培され、さらに2007年には23



世界における遺伝子組換え作物の栽培状況
(バイオテック情報普及会ホームページより)



作物別作付け面積と作付け面積の推移
(バイオテック情報普及会ホームページより)

カ国で約1億1430万ha、2008年には25カ国で約1億2500万haに栽培された（ISAAA調査）。これは2008年現在の日本の全耕地面積約462万haの27倍もの面積に相当する。2008年の遺伝子組換え作物の生産国は北米ではアメリカ、カナダ、中南米ではメキシコ、ホンジュラス、コロンビア、チリ、アルゼンチン、ウルグアイ、パラグアイ、ブラジル、ボリビア、アジア・オセアニアでは中国、インド、フィリピン、オーストラリア、アフリカでは南アフリカ、ブルキナファソ、エジプト、ヨーロッパではポルトガル、スペイン、ドイツ、チェコ、ポーランド、スロバキア、ルーマニアである。この中で注目できることは栽培国25カ国の中で15カ国が発展途上国であるということである。

ISAAAの遺伝子組換え作物の商業栽培に関する世界のハイライト2008では遺伝子組換え作物の貢献を導入後の状況分析をもとに以下のようにまとめている。

1) 食料を安価に提供すること 食料、飼料、繊維の確保



除草剤をまいても枯れないダイズ

左：除草剤無散布 右：除草剤散布区
2005年7月（独）農業生物資源研究所提供

- 2) 生物多様性の保全
- 3) 貧困と飢餓の緩和
- 4) 農業による環境への負担の低減
- 5) 気候変動の緩和、温室効果ガスの減少
- 6) バイオ燃料の効率的生産
- 7) 1996年から2007年にわたる440億ドル相当の経済効果

これら7つの項目から、世界ではいかに遺伝子組換え作物が普及し、多くの貢献をもたらしてきたかが見取れる。また、とくに2008年に注目すべきこととして複数の形質を併せ持つ「スタック」と呼ばれる品種が単一の形質の組換え品種よりも早い伸びで増加したことも指摘されている。これらの項目は世界中で直面している食料・飼料・繊維・エネルギー資源の確保、気候変動への対応と対策に遺伝子組換え作物が有効であることの表れであろう。

以上に述べたように、遺伝子組換え作物栽培には多くの利点があり、海外諸国では、それぞれの農業経営のあり方に対応して遺伝子組換え作物の利点を評価した上で栽培が拡大している。わが国の農家を想定して、たとえば除草剤抵抗性大豆と害虫抵抗性トウモロコシを栽培した場合の利点あるいは欠点について考察してみたい。まず、これらの遺伝子組換え作物の導入によって除草剤、殺虫剤の使用量、散布回数が減少し、労力、燃料、農薬コストが減り、加えて虫害や雑草害も減るので単位面積あたりの収量は増加して、農家の収入が増加すると予想される。また、日本のように高齢化の進んだ農家では労力の軽減は非常に大きな利点となろう。さらに、農薬使用の減少により、農業者自身の健康被害や事故が減り、耕地や水への環境負荷(汚染)物質の流入も減少するであろう。

一方、欠点については人により考えが異なるところがあるが、現在の日本の消費者からは遺伝子組換え食品が諸手をあげて受け入れられていないという現状があり、栽培農家からは「売れるかどうか」あるいはいわゆる「風評被害」を招くという懸念がある。さらには、除草剤耐性作物については、複数年にわたり同じ除草剤のみを使用するような不適切な使用方法によって除草剤をかけても枯れないという除草剤耐性雑草の出現の加速化が予想されること、などがあげられる。こういった事情からわが国での遺伝子組換え農作物(食品)の商業栽培は現在のところ青いバラ以外は皆無であり、世界に大きく遅れをとっているのが現状である。

中国ですでに圃場試験が進められている害虫抵抗性稲はおよそ4億4000万人の貧しい農家の収入を増やすと試算されている。アジア全体ではおよそ10億人の人々が稲作に依存する貧しい農家であり、稲の遺伝子組換え品種には大きな期待が寄せられている。さらに、早^{ぼつ}魃耐性やさまざまな環境負荷物質耐性および環境浄化作用を有する作物の開発は世界的に重要な課題であり、目下のところ作物の中にそれらの解決をもたらす遺伝資源は存在しないため、遺伝子組換え技術は有望な技術である。そして、私たちの抱えるさまざまな問題を解決する、「農家がうれしい作物」、「消費者がうれしい作物」、「環境にやさしい作物」が育成される可能性を含んでいる。

3. 遺伝子組換え作物の安全性について

「遺伝子組換え作物は安全か?」という話題をテレビや新聞などを通して見聞きすることがあるが、読者の皆さんはこの問いに根拠を持って答えられるだろうか。内閣府の食品安全局では、毎年、食品安全モニターを対象とした調査を行い、「食品の安全性に関する意識等について」としてその結果を発表しているが、2009年7月実施の調査においても、回答の65%が遺伝子組換え食品に不安感を示している。すなわち、遺伝子組換え作物は安全性に不安があるとされている。

さきの問いを「作物は安全か?」とするとどうだろう。たとえば、ジャガイモにはソラニンというアルカロイド毒が含まれている。また、豆類にはレクチンという物質が含まれていて、生のまま食べると下痢をしてしまう。実は、すべての作物が確実に安全とは確認されておらず、安全かどうかを判断しなければならないのは「遺伝子組換え」だけではなく、これまでの「作物」にもある。しかし、私たちは調理の際に、ジャガイモはソラニンが多く含まれる芽をとり除いて、豆は加熱してから食べるというように、経験に基づいて危険を回避する方法を工夫し、安全を確保している。では、遺伝子組換え作物に関してはどのように対処されているのだろうか。

遺伝子組換え技術の利用にあたっての安全性の検討は、1970年代から科学者自身が提起して始まり、その後、国際的な議論が積み重ねられた。現在の日本では国際協定に基づき、遺伝子組換え製品の安全性については科学的な方法で評価し、安全性が確認されたもののみ生産・

販売できる仕組みが法律に基づいて運用されている。ここでは、遺伝子組換え作物はどのようにして安全性が懸念されるのか、遺伝子組換え作物は従来の作物と何が違うのか、また、どうすれば安全性が確保できるのか、安全性確保の枠組みについて紹介する。

1) これまでの作物と遺伝子組換え作物の違い

現在利用されている作物のほとんどは、野生植物を人手によって改良し、人間にとって都合の良い性質を多く持たせた植物である。栽培しやすいことや、食べておいしく栄養があって、肥料をたくさん施すと大きく育ったりもするが、害虫やカビがついたり、除草の手間もかかる。作物というのは人の手を離れて野生で生き残るのは難しい。作物は、長い時間をかけて作り出される鍾乳石やウナギ屋のたれと同様に、人と植物との長年のかかわりにより生まれた、いわば生きた歴史の財産と言える。

作物の品種改良にはいろいろな方法があるが、一般に、自家の花粉をあらかじめ除去しておき人工交配を行う。交配により、母親のみの遺伝子のバリエーションに、父親のバリエーションが加わる効果と同時に、両者のまったく新しい組み合わせの効果により、従来にはないさまざまな雑種植物ができあがる。稲や麦に限らず、バラやチューリップなどの花き類まで、毎年たくさんの新品種が発表されるのは、自然界において生物が、生殖の過程で遺伝子を組換えしている現象を人間がうまく利用しているからだ。

遺伝子組換え作物を作る目的も、作物により良い性質を持たせるためである。従来の作物と違うのは、新しい雑種を作るのに生殖細胞を使わず、遺伝子だけを作物以外の生物からも取り出して、改良したい作物の遺伝子に導入することによりバリエーションを加えていることだ。とはいえ、これまでの交配などの育種技術から生まれてきた優良品種は、時間をかけてたくさんの遺伝子を集積し、その遺伝子間のネットワークにより成り立っている。それを遺伝子組換え技術によって1から一つ一つ組み上げて新しい作物を育成することは現在の技術では不可能である。だから現在の遺伝子組換え技術では、数万を超える遺伝子が集積されている作物に、数個の新たな遺伝子を導入することで品種改良を行っている。

2) そして、安全性が懸念される理由

ここから、遺伝子組換え技術の安全性に対する2種類の懸念を、想像上の遺伝子組換え実験で説明する。

1つめの懸念は、既知の有害性に関係する遺伝子を利用するような場合である。作物「クロ」は有害性を現す働きを持つ遺伝子「p」を持つが、誰もが経験上、クロを無害化して安全に利用する方法を知っている。一方、別の作物「シロ」は遺伝子「p」を持たず、誰もが経験上シロは無害であることを知っているとする。クロとシロは別の作物のため、クロの遺伝子は交配ではシロに導入できない。以上を前提条件として、遺伝子組換え技術を使ってpをシロに導入できたとすると、次のような懸念が生じる。「外観はそのままでも有害化したシロができた時に、シロは安全という経験則があるため、被害が生じるのではないか」という懸念である。

2つめの懸念は、次のような場合である。作物「シロ」と「アカ」はともに無害な別の作物であり、アカの遺伝子「a」を「シロ」に導入する。aは有害性を現すような機能は持たないことが知られている。このような場合に、何らかの被害が生じるのではないかという懸念である。

1つめの懸念は、かなり極端な想定とした。これまでにこのようなタイプの遺伝子組換え作物の使用申請は出されていないし、後に述べる法律に基づく安全性評価の過程においては、遺伝子の機能についての知見が必須の情報として提出されることとなっており、もしそれが有害性に関連するものであれば、改良された作物は有害性を持つと考えられることから、安全性が確認できないとして使用申請は却下される。ここでは、作物の安全な利用を考える上では、その作物を扱う経験というものが重要な要因となることを覚えておいていただきたい。

2つめの懸念は、上の記述からはどのような被害が生じるのか想像できないかもしれない。次の文章は、1993年までに国際的な検討の中から生まれた文書に書かれており、ほぼ直訳である。「特定の遺伝資源の組み合わせで、新たに生じた生物に関する取り扱いの経験が不足している場合には、ある特定の懸念が生じるとの認識であり、安全性への配慮が必要な理由である」。つまり、遺伝子組換え技術は、生物と生物の間の遺伝子の新しい組み合わせの可能性を飛躍的に高めるもので、人類にとって新しい経験である。遺伝子組換え作物にも、「作物」と同様のレベルで安全なものや危険なものもあるかもしれない。

「作物」の危険については、ジャガイモのように長年の経験で安全性を確保してきたのに対し、「遺伝子組換え作物」の方は人類が利用し始めてまだ20年ほどしか経っていないのだから、利用の経験を積むまでは、懸念を持って安全性に配慮した取り組みが必要ということである。

3) 安全性の考え方の基本

遺伝子組換え技術の安全性について、1980年代になって、国際的な規制の調和の必要性が求められたため、OECD（経済協力開発機構）の場で各国の専門家による検討が行われ、遺伝子組換え技術の安全性の懸念にはどんなものがあるかを科学的に明らかにしようとする努力が払われた。当初は、「予期しない性質を持った生物が誕生し、“何かとんでもないこと”が起こるかもしれない」という意見があったが、現在では「危険性があるならその性質に応じた対策があり、危険性がないなら規制の必要はない。安全性の検討は科学的な根拠に基づき判断すべきである」として、安全性評価は科学的な方法によって行う、いわゆるサイエンスベースの考え方が基本となっている。また、遺伝子組換え生物であってもそうでなくても生物の活動は同じ物理的、生物的な法則に従っており、遺伝子組換え技術に固有の危険は生じないという考え方が定着してきた。これにより、作出された組換え体がどのような製品かによって、従来その製品の安全性に関する性質を見極めるために用いられてきた方法及び経験に基づく、いわゆるプロダクトベースでの安全性評価が可能になった。さらに、安全性評価は相対評価を原則としている。どんな作物であっても、環境やヒトに対して何も影響を与えないということはない。「遺伝子組換え作物は安全か？」という絶対評価ではなく、遺伝子組換えを行って改良しようとする作物（宿主とよばれる）自身と、遺伝子組換え後の作物の比較により、新たに獲得あるいは変化した性質を対象として相対的に安全性を評価することとなっている。

4) 安全性評価の方法

わが国で遺伝子組換え作物を使用するにあたっては、法律の枠組みの中で、作物の使用の目的に応じて科学的な手続きによる生物多様性影響評価、食品安全性評価または飼料安全性評価が行われ、専門家による審査を経て

承認された遺伝子組換え作物のみが流通、利用できることとなっている。また、安全性評価にあたってはリスクコミュニケーションの観点からも、申請者の知的所有権を侵害しない範囲で遺伝子組換え作物の内容、議事録、及び評価の概要がHP上で公開されている。

(1) 環境に対する安全性

わが国における遺伝子組換え生物の使用に際しては、カルタヘナ法に基づいて規制されている。遺伝子組換え作物を野外で使用する場合、このような形態は第一種使用と呼ばれ、農地の周辺に生息する野生の動植物との接触が考えられるため、野生生物への影響を懸念して安全性が評価されることとなっている。環境影響をはかる上では、遺伝子組換え作物の性質、使用のしかた、受容環境の3項目によって結果が異なるので、1つの遺伝子組換え作物ごとにこの前提条件を示した第一種使用規程を作成し評価を受けることになる。遺伝子組換え植物の評価の項目としては、3つの性質が上げられている。それらは、i) 競合における優位性、ii) 有害物質の産生性、iii) 交雑性である。競合とは、生物の生存競争に関わる性質のことであり、作物の生育の速度、大きさや種子の数などが影響する。有害物質とは、主に他の植物の生育に影響を及ぼすアレロパシーと呼ばれる効果を持つ物質のことである。交雑性とは、主に花粉を介しての遺伝子伝搬性のことであり、葯の数や大きさ、花粉の数や大きさ、花粉の稔性、交雑率などが影響する。以上のデータに基づき、(a) 遺伝子組換え生物自身は何らかの影響を及ぼす可能性のある性質を持つか、(b) その影響が起きた場合にどのような結果が生じるか、(c) 使用する環境の下でその影響が起こりうるかどうか、(d) 総合的な評価、という順番で評価することになっており、最終的に環境大臣及び農林水産大臣が認可したものが栽培できる仕組みである。

(2) 食品としての安全性

「遺伝子組換え食品」とは、遺伝子組換え技術を応用して得られた生物に由来する食品である。この中には遺伝子組換え作物を原料としたもの、遺伝子組換え微生物を用いて発酵など加工した食品がある。遺伝子組換え食品の安全性は、食品衛生法という法律に基づいて、厚生労働省の諮問を受けて内閣府食品安全委員会が評価することになっており、この安全性評価を経たものでなけれ

ば利用できない。安全性評価は、定められた基準に基づき科学的に審査される。これまでに「遺伝子組換え食品（種子植物）の安全性評価基準」、「遺伝子組換え微生物を利用して製造された添加物の安全性評価基準」及び「遺伝子組換え食品（微生物）の安全性評価基準」が作成された。遺伝子組換え食品を評価するには、まず、既に食経験のある従来品種と比較しうるものがあるかどうか判断される。比較しうるものがない場合は、評価することができないとされる。比較しうるものがある場合には、遺伝子組換えにより新たに付加したものの、変化したものが、ヒトの健康に与える影響を評価する方法がとられている。遺伝子を導入したことにより、非意図的な栄養成分含量の変化や有害成分含量変化が生じていないか、アレルギーを誘発する可能性はないか、このような項目で、人の健康に影響を及ぼすような新たな物質の産生がないと確認された場合は、各種の毒性試験や生殖影響試験、変異原性試験などは実施する必要はないとケースバイケースで個別に判断される。

(3) 飼料としての安全性

遺伝子組換え技術を利用して作られた飼料及び飼料添加物は、飼料安全法によって安全性確認が義務づけられている。家畜に対する安全性については、農業資材審議会が検討され、家畜が摂取したことにより生じうる人への健康影響については、遺伝子組換え食品と同様に食品安全委員会が評価を行っている。すべての飼料利用形態を考慮して評価が行われる。飼料の評価基準には食品と共通する部分が多いが、人が食べない部分や食品製造の副産物を飼料として利用することもあり、また飼料作物には食品と異なる生物種があること、家畜が食べる量や消化のしくみが人とは異なることなどに対応している。これまで飼料として利用経験のある宿主と同等のものを見なしうるかどうかを評価した上で、宿主に付加されることが予測されるすべての性質の変化について評価を行う。農林水産大臣が安全性を確認したものでなければ利用することができない。

4. 日本における遺伝子組換え作物研究の現状と今後の課題

これまでに紹介してきたように、世界的には、遺伝子組換え作物の開発は今後の農業生産の持続可能性、生産

性の向上などの点から極めて重要なものとして位置づけられ、戦略的に取り組んでいる国も多い。わが国はイネゲノム研究など世界に誇るべき先進的な研究を始め、植物科学分野の基礎研究のレベルは世界のトップクラスにある。しかし、応用的な研究となる遺伝子組換え作物の開発については、残念ながら他国の後塵を拝する状況にあり、世界の潮流から大きく取り残されている。これはわが国の基礎研究のレベルの高さから考えると、むしろ奇異にすら思える状況である。

後述するように、わが国でもさまざまな作物種を対象とした研究開発が行われており、それぞれ成果も得られているとはいえ、未だに研究開発段階のものが多く、商業栽培まで進んだものは青いカーネーションとバラだけである。研究開発の活発さに比例すると思われる、屋外での栽培承認の件数を見ても、国内開発のものは年に数例であり、欧米には遙かに及ばず、中国にも大きく水をあけられている。これは、わが国の審査要件が、基礎研究を目的とした文科省、開発研究を目的とした農水・環境両省による審査のどちらも、諸外国に比べて異例とも言える厳しいものであり、実施にあたっては、周辺住民や自治体などへの説明が必要であるなど、ハードルが高いことにも一因がある。また、わが国における遺伝子組換え技術の認知度の低さと、そのことによる研究者のモチベーションの低下も理由として上げられよう。

また、前述のようにわが国における遺伝子組換え作物の商業栽培は今のところ青いバラのみである。青いカーネーションの栽培は海外で行われている。海外で開発された遺伝子組換え作物の中にはわが国でも農作業の軽労化の点から有用なものもあると思われる。わが国が世界有数の遺伝子組換え作物の輸入国であることを考えると、このことは、むしろ不思議なことであるが、国民の間にある遺伝子組換え作物に対する、不正確な情報に基づいた忌避感情が払拭されていないことにも原因があり、これがわが国の開発研究が盛んにならないことにもつながってきていると思われる。さらに国としての栽培・流通の方針が定められていない一方で、一部の地方自治体の実質的には栽培禁止ともいえる内容の条例などを定めていることも理由として上げられよう。こうした要因が相互に作用してますますわが国の研究開発を遅らせる負のスパイラルに陥っていることも否定できない。

こうした状況はわが国の将来のために望ましいものではないことは言うまでもない。また、研究担当者の努力

だけではどうにもならない面がある。そこで、国としてもこうした点を克服していくための戦略を構築するために、内閣府のバイオテクノロジー（BT）戦略推進官民会議での議論から、その方策として、ドリームBT戦略大綱で、「創造的研究開発によるフロンティア開拓の加速化、新技術の開発の加速と社会への迅速な普及」と並んで国民理解の促進のため、「バイオテクノロジーに関する教育の推進、リスクコミュニケーションのさらなる推進、国のリーダーシップによるバイオテクノロジーに関する国民理解の推進」の重要性を指摘しているところである。研究側としても、こうした国民への情報提供と国民による認知度の向上についても注力する必要があるだろう。

今後の組換え作物の開発方向については、農林水産省でも2008年1月に「遺伝子組換え農作物等の研究開発の進め方に関する検討会」における最終取りまとめを発表しており、農水省関連の独立行政法人研究機関では、これに沿って研究開発を進めているところである。

以下では、わが国で行われている遺伝子組換え作物の開発研究の現状を作物ごとに概観し、わが国の研究開発の状況をご紹介します。

1) 水稲

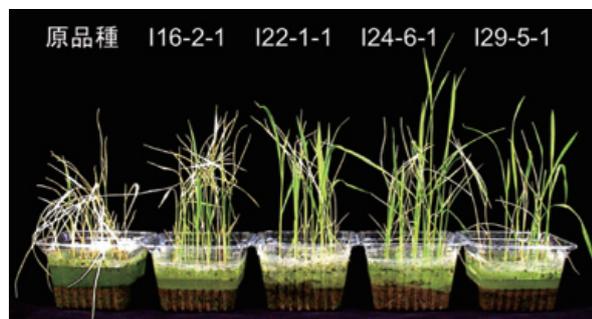
水稲はわが国の基幹作物であり、研究対象としても多く取り組まれている。基礎研究としては、わが国がイニシアティブを取って進め、水稲の全ゲノムの解読を果たしたイネゲノムプロジェクトや、その成果を活用した基礎研究によって水稲の遺伝子とその機能について、極めて多くの成果が得られつつある。当然、遺伝子組換えによる品種の開発を目指した研究も進められている。水稲では、これまでの長年にわたる育種や栽培研究者の努力により、一般の食用品種については、品種・栽培技術とも既に極めて高度なレベルに達している。また、わが国での数少ない完全自給作物でもあることから、今のところ、遺伝子組換えによる耐病性、収量性、食味などの農業特性の改良への需要は多くはない。そのため、現状では、わが国の遺伝子組換えによる水稲の研究開発は、新たな機能性の付与や飼料用品種の開発に集中している。

新たな機能性の付与の実例としては、(独)農業生物資源研究所が日本製紙(株)他と共同で開発した花粉症緩和米が著名である(<http://www.nias.affrc.go.jp/gmo/>

simple.html)。この研究では、スギの花粉の表面にあるタンパク質の中であって、ヒトが花粉を「異物」として認識する部分だけを取り出し、米粒の中に含まれるようにした稲を開発した。この米を食べ続けると、やがて、花粉が「異物」とは認識されなくなり、結果として花粉症の症状を起こさなくなる。今後医薬品としての開発が進められることになっている。(独)農業生物資源研究所では、この他にも血糖値や血圧を下げるような成分を含む水稲の開発も進めている。

一方、水稲を家畜の飼料として利用する研究開発も、(独)農業・食品産業技術総合研究機構(以下農研機構)傘下の研究機関で進められている。わが国で使われる配合飼料はほぼ全量、海外から輸入した穀物によっており、このことがわが国の食料自給率を下げる要因にもなっている。一方では生産調整による耕作放棄地の活用も重要な問題である。こうしたことから、一般の食用品種とは異なる形質を持つ飼料用の品種の開発が重点的に進められている。飼料イネについては、輸入穀物との価格差が大きな問題であり一般食用に比べても低コスト生産が重要になる。

飼料イネでは、低コスト生産に資する形質として除草剤抵抗性や病害抵抗性を持つ品種の開発が必要とされており、開発が進められている。病害抵抗性については、これまでも従来の交配育種によって多くの病害抵抗性品種が育成されてきたが、一部の重要病害では、そもそも水稲の中に抵抗性を持った遺伝資源が存在しないため、交配育種による耐病性の向上は困難であり、遺伝子組換え技術の利用が求められる。農研機構作物研究所や中央農業総合研究センターでは、作物が本来持っているさまざまな能力を活用することによって、効果的な除草剤抵抗性や、これまでは対処できなかった病害に



小麦のフルクタン合成酵素の遺伝子を導入した稲の幼苗を5℃で11日間低温処理した後、常温に戻した1週間後の状態。数字で示されているのが組換え体。(農研機構北海道農業研究センター 佐藤裕氏提供)

対する強い抵抗性を有する遺伝子組換え品種の開発を進めている。こうした取組みによって、飼料イネ栽培のコストを減らし、飼料自給率の向上と耕作放棄地の削減に貢献することが期待される。

一方、飼料イネでは生産の安定も重要である。北日本の水稲栽培では、数年毎に起こる冷害による収量の不安定化が大きな問題となる。今年も北海道では被害に見舞われた。水稲の耐冷性はこれまで交配育種により着実に向上してきたが、より安定した生産を行うためには、これまで以上の強い耐冷性の付与が必要である。特に寒冷地における飼料イネの低コスト栽培では、交配育種での限界を越えた耐冷性の強化が重要となる。そこで遺伝子組換え技術の利用が有効となる。農研機構北海道農業研究センターでは、耐冷性に関係する遺伝子を飼料イネ品種に導入することによって、これまで交配育種では達成できなかったレベルの強い耐冷性を付与することに成功しており（特開 2007-000050）、この技術の飼料イネへの利用が期待される。これにより、飼料イネの安定的な栽培に寄与できるものと期待される。

また、飼料イネの栄養成分を改良するための研究が作物研究所で進められている。家畜には必要な栄養成分をバランス良く含む飼料を必要な量だけ施用することが重要であり、このことは家畜の排泄物を低減する上にも有効である。飼料イネではトリプトファンやリジンなどの必須アミノ酸の含有量が相対的に少ないため、これらの必須アミノ酸を多く含む飼料イネは付加価値の点からも重要であるが、交配育種による作出は困難であり、遺伝子組換え技術の適用が期待される。必須アミノ酸を多く

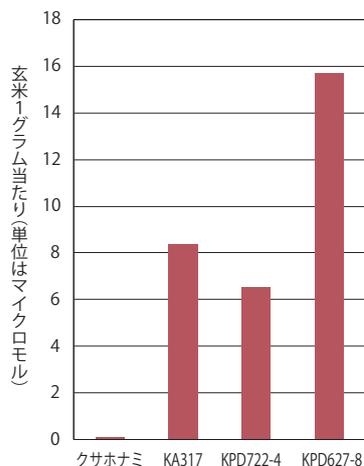
含有させるためには、その生産量を制御している酵素の構造を部分的に改変し、蓄積量の制限を緩和させる技術が有効である。農研機構作物研究所は北興化学（株）と共同で、このような戦略によってトリプトファンを多く含むイネの開発に成功しており、引き続き他の必須アミノ酸の高含有化にも取り組んでいる（特開 2004-350692）。これにより、環境負荷を低減した環境保全型の畜産経営に貢献することが期待される。

2) 花き

花きについてもさまざまな取組みが行われている。花きの特質として、多くの場合観賞用であり、食品や飼料としては使われるケースは少ない。このことは、遺伝子組換えの花きについて、穀物の場合とは異なり、食品や飼料としての安全性評価が不要となる場合が多いことと、さらに国民からの受け入れの面でも、食品や飼料の場合よりもハードルがかなり低い可能性があることを意味している。

花きへの遺伝子組換え技術を適用する形質としては、害虫抵抗性のような形質も考えられるが、もっとも多く取り組まれているのが花の形態や色の改良である。このうち、形態については目標として複雑であり、基礎研究が行われている段階であるが、花色については、サントリー（株）によって青色のカーネーション（商品名はムーンダスト）や青いバラが開発され、わが国での数少ない商品化開発の成功例として、商業栽培が行われ、既に市販されている。

古来より「青いバラ」は不可能の代名詞であり、長年の品種改良にもかかわらず、だれもが成功できなかった目標であった。同様にカーネーションでも青色品種の開発には誰も成功できなかった。この理由として、もともと



各組換え系統の遊離トリプトファン含量



青いカーネーション「ムーンダスト」
(株) サントリーフラワーズ提供



青いバラ「サントリーブルーローズ
アプローズ」

と、これらの植物には、青色を出すための青色色素が存在していなかったことが上げられる。花の色は、それぞれ特有の色素によって表れるものであるが、カーネーションやバラでは、青色を示す色素であるデルフィニジンを合成するための系が存在していなかった。生体内では、簡単な物質から酵素反応によって順次構造を変更し、最終的に目的の物質を生産する代謝系が機能している。カーネーションやバラでは、青色色素を作る代謝系が途中まではあり、そこから別の色素を作ることはできるが、青色色素へと分岐させるための酵素を持っていなかった。そこで、サントリー（株）の研究者はフロリジェン社と協同して、ペチュニアから、この酵素の遺伝子を取り出し、これを赤いカーネーションに導入することで、青色のカーネーションの作出に成功した。続いてパンジーから同じ機能を持つ遺伝子を取り出し、バラに導入し、青色のバラを作出することにも成功した。

この青色化技術は基本的には他の植物へも応用可能であり、青色の花が比較的少ないこともあって、有望な開発目標となっている。農研機構花き研究所でもサントリー（株）との共同研究で青色のキクの開発に取り組んでいる。この他にも青色化の取組はさまざまな植物で進められており、わが国が世界をリードしている数少ない分野として注目されている。

3) 小麦

麦類の遺伝子組換え研究の進展状況は、水稻に比べてたいへん遅れている。主な原因は、組換え体の作製過程での組織培養及び遺伝子の導入が困難なためである。小麦を主食とする欧米では、麦類への遺伝子導入系の開発に早くから着手していたが、それでも成功している研究機関はいまだ数カ所に限られている。わが国では、農研機構が2003年に作物ゲノム育種センターを設置し、小麦の遺伝子導入系の確立を進めてきた。2006年からは作物研究所の麦類遺伝子技術研究チームがその研究を引き継ぎ、パーティクルガン（DNAを塗布した金属粒子をガス圧によって加速し、植物細胞内に打ち込む方法）を用いた手法で、世界的にも高水準の効率で小麦の遺伝子導入系を確立することができた（特開2008-212048）。

麦類で遺伝子組換え技術を利用すべき農業特性にはどのようなものがあるであろうか。

麦はわが国の食生活において、パン、めん、菓子、み

そ、麦ごはんの押し麦など多様な用途で利用されている。麦は国民1人が1日に摂取するカロリー全体の12%程度を占めているが、自給率は小麦が13%、大麦が8%であり、消費されている麦の大半を国外からの輸入に頼っている。わが国において将来にわたり食料の安定供給を確保するためには、食料の自給力向上が必要であり、その中で麦は重要な位置を占めている。

わが国における麦の高品質安定生産を妨げる大きな要因には、穂発芽と湿害がある。麦類は中央アジアの半乾燥地域を起源とする作物であるため、降雨の多い日本の栽培環境では穂発芽や湿害が多く発生する。穂発芽は、収穫前に雨濡れした麦が発芽してしまうことにより品質が著しく損なわれるもので、麦類は収穫期がちょうど梅雨にあたるため毎年のように被害を受けている。湿害は、過剰な土壌水分環境により減収するもので、小麦の栽培面積の約25%で発生が報告されている。穂発芽及び湿害に関しては、長年にわたり品種改良や栽培技術の開発などにより改善が図られてきたが、解決には至っていない。前述の農林水産省の発表した「遺伝子組換え農作物等の研究開発の進め方に関する検討会」における最終取りまとめでは、政策的な重要性があり、遺伝子組換えを用いなければ実現できないものに対してこの技術を活用することが前提条件として示されているため、わが国における麦類の遺伝子組換え研究では、耐穂発芽性、耐湿性が重要な研究対象となっている。

前述したように、小麦において遺伝子導入系が確立されたことで、ある形質に関わることが予想される遺伝子を小麦に導入し、遺伝子の効果の一つ一つ評価することが可能となった。耐穂発芽性に関わる遺伝子については、種子の登熟と発芽の過程で発現する遺伝子の網羅的な解析からいくつかの候補遺伝子を発見した。このうちの1つは、種子の休眠を深くすることで、麦を発芽させないように働く遺伝子ではないかと推測している（2008年特許出願）。現在、この遺伝子を小麦に導入して、種子休眠の維持にどれくらいの効果があるかを検証している。

耐湿性に関しては、2008年度より「生物系特定産業技術研究支援センターのイノベーション創出基礎的研究推進事業」において遺伝子の探索に着手した。耐湿性の強い植物は、根に空気を供給する通気組織が発達しており、実際にトウモロコシの耐湿性育種に利用されている近縁野生種のテオシントは根に著しく発達した通気組織を形成する。そこで、テオシントの通気組織形成に関与

する遺伝子を単離し、小麦へ導入して効果を検証する研究を進めている。交雑のできない異なる種を遺伝資源として利用し、その有用な遺伝子のみを導入できるという遺伝子組換え技術の最大の利点を活用した画期的な試みである。

わが国における麦類の遺伝子組換え研究では、遺伝子組換え技術を活用して有用な遺伝子を同定することが始まった状況にあり、実用化に向けてはまだ多くの課題がある。特に、耐湿性、耐穂発芽性には多数の遺伝子が複雑に関与していることが考えられ、従来の手法で解決されなかった原因もここに集約される。このため、関与する遺伝子の同定に向けて、遺伝子組換え技術を駆使しながら、さまざまな角度から切り込むことが必要になる。主要穀物である麦類での遺伝子機能の解明およびその知財化は、世界的に大きな価値を生み出す可能性がある。結果が出るまでに時間のかかる研究分野であるが、今後の技術開発の発展が望まれる。

4) 大豆

遺伝子組換え大豆は世界で大規模に栽培され流通しているが、意外にも近年まで大豆は遺伝子組換えが難しい作物の一つであった。しかしさまざまな改良が重ねられた結果、現在では熟練した技術を伴わなくとも実行可能な方法として確立されつつある。

ここでは日本における遺伝子組換え大豆研究の現状について、遺伝子導入法（直接導入法、間接導入法）ごとに特徴および今後の課題を紹介する。

(1) 直接導入法

直接導入法は外来遺伝子を目的とする作物種の細胞に物理的に挿入することによって核DNAやプラスチドDNAに遺伝子を取り込ませる方法である。日本において多くの研究者は主に大豆の未熟種子から誘導した培養組織である不定胚にパーティクルガンを利用して外来遺伝子を導入し、個体再生を経て遺伝子組換え大豆を作出してきた。この方法が採用された理由には次のことが上げられる。1. 遺伝子導入の標的となる大豆不定胚の個体再生能力が高い。2. パーティクルガンはアグロバクテリウムを利用する方法に比べて多くの植物種に適用できる。また、近年DNAを塗布した針状結晶を超音波処理により不定胚に導入するウイスカ法も行われている。

パーティクルガン法では、米国の大豆品種FayetteやJackなどが利用されている。目的遺伝子を撃ち込んだ大豆不定胚から遺伝子組換え個体へ再生して、閉鎖系温室内で栽培する。不定胚の作成から約1年で組換え大豆の種子が獲得できる。この方法を用いて、日本国内ではこれまでに病虫害耐性や湿害耐性を目指したストレス耐性組換え大豆や、種子成分の改変及び機能性物質などの有用物質生産を目指した組換え大豆の開発が行われている。

以上の方法は、パーティクルガンなどの装置を備え、大豆不定胚の培養を安定した条件で維持できる環境があれば実用的な効率で遺伝子組換え大豆を作出できるが、次のような問題も抱えている。すなわち、不定胚誘導と再分化能力が低い品種が多く、適用できる品種が少ない。また、パーティクルガンによる物理的遺伝子導入は、目的の遺伝子が断片化したり、過剰に多くの遺伝子が導入されやすくなり、目的遺伝子の効果が発揮されなくなるジーンサイレンシングという現象を起こしやすい。

(2) 間接導入法

間接導入法を代表する手法としてアグロバクテリウム法があげられる。この方法による大豆の遺伝子組換えは1988年に米国で初めて成功例が報告された。当初は成功例の限られた難しい方法であったが、培地の改良、用いる大豆組織の選択、組換え体選抜条件の改良等のさまざまな工夫が重ねられ、現在では、用いる大豆品種にもよるが、組換え体の得られる可能性が高い技術となった。本法の利点としては次のような点が上げられる。すなわち、直接導入法では不定胚を用いる場合が多いため適用可能な品種に限られるが、本法は日本の品種を含めたさまざまな品種で組換えが可能である。また、アグロバクテリウム法は遺伝子の断片化や多コピー化が起こりにくいとされる。

わが国においては、アグロバクテリウム法による大豆の遺伝子組換えは農研機構を含めた数カ所の研究機関で行われており、カリユタカ、スズユタカなどの日本品種でも成功し、水稻には及ばないが実用的な効率で組換え体を作出できる状況に近づきつつある。しかし、組換え体の得られる効率は品種による差が大きい。国内におけるこれらの組換え体作出の目的は種子成分の改良や環境ストレスに対する耐性を与えることなどさまざまであるが、まだほぼすべての研究が進行中で

あり、数年のうちに成果が現れてくるものと予想される。今後は、導入する有用遺伝子の選択と作出された組換え体の評価が一層大切になると同時に、より多くの有用（候補）遺伝子の効果の検証を可能にするためにも組換え体作出効率の向上などの技術改良も重要であり、これらを両輪として遺伝子組換え大豆研究を進めていく必要がある。

5) その他

これまで紹介してきた作物種以外のものでもさまざまな植物で遺伝子組換えによる開発が行われている。たとえば、林木については、筑波大学で耐塩性を強化したユーカリの開発が進められており海外からも注目を集めている。また（独）森林総合研究所では生産性向上を狙ったポプラの開発が進められている。野菜についてはウイルス病に抵抗性を持つレタスの開発が農研機構野菜茶業研究所で進められている。ジャガイモやサツマイモでも開発に取り組まれている。また、果樹では農研機構果樹研究所が、牧草では農研機構畜産草地研究所が、今のところ基礎的な研究段階であるが、さまざまな研究を進めている。

これまで紹介した遺伝子組換え作物の開発とは別に、わが国では、これらの栽培にあたっての安全・安心の確保と、既存の農法との共存を図るための研究も盛んに行われている。先にも解説したように、商業目的で栽培さ

れる遺伝子組換え作物は、環境へ与える影響並びに食品・あるいは飼料としての安全性が確認されたものに限られる。したがって、それらの栽培は本質的に問題のないはずのものである。とはいえ、遺伝子組換え作物への忌避感を持つ国民も存在する。また、将来、遺伝子組換え作物のわが国での商業栽培が開始される状況になっても、遺伝子組換えでない品種を栽培したい農家もあらずであり、そのような人たちの権利の保全も重要と考えられる。そこで、農林水産省の委託研究として、従来の非遺伝子組換え作物と遺伝子組換え作物との共存を目指し、花粉による交雑を抑制するための技術、実際に栽培が行われる状況を想定して、交雑の定量的な予測をするため実測や理論的な研究、収穫・輸送などの過程での混入の可能性の評価などの研究が進められている。具体的な成果の例として、花が開かず花粉が花の中に留まるため、花粉飛散が抑制される性質を持つ水稻の開発や、同じく植物細胞の中の葉緑体に遺伝子を組み込むことで、花粉による飛散が起こらないようにするための技術開発などが進められている。また、実際の商業栽培が行われると想定した場合の交雑や混入の可能性について予測するための知見が集まりつつあり、遺伝子組換え作物と、その他の作物の栽培における共存、あるいは遺伝子組換え作物を栽培する農業者と、これを避けたい者との間のそれぞれの共存を図るための基礎的なデータが得られつつある。

最後に

以上、わが国における遺伝子組換え作物の開発研究に関する現状と問題点を紹介した。遺伝子組換えの研究や技術開発はまさに日進月歩であり、私たち研究者は、日夜世界で発信される情報に神経を尖らせつつ、技術開発に取り組んでいる。わが国の遺伝子組換え研究開発のレベルを海外諸国と同等なレベルに維持し、さらに世界をリードしていくためには、知財戦略として、基礎研究により得られた新規な知見に対して特許出願による権利化の促進が重要であることは言うまでもない。今後とも、知財戦略に配慮しつつ研究開発を進めたい。



通常の稲（左）と花が開かない「閉花性」稲（右）の開花状況
（農研機構中央農業総合研究センター 吉田均氏提供）

執筆分担者

1. 遺伝子組換え作物とは：廣瀬咲子・川岸万紀子
2. 世界における遺伝子組換え作物栽培の現状：
廣瀬咲子・川岸万紀子
3. 遺伝子組換え作物の安全性について：川口健太郎
4. 日本における遺伝子組換え作物研究の現状と今後の
課題：大島正弘
 - 1) 水稲：大島正弘
 - 2) 花き類：大島正弘
 - 3) 小麦：安倍史高
 - 4) 大豆：藤郷 誠・西澤けいと
 - 5) その他：大島正弘

profile

大島 正弘 (おおしま まさひろ)

1982年 農水省入省、農業技術研究所研究員
 1983年 農業生物資源研究所研究員、主任研究官
 1998年 北陸農業試験場育種工学研究室長
 2003年 農研機構作物研究所稲研究部上席研究員
 2006年 農研機構作物研究所稲遺伝子技術研究チーム長
 専門は遺伝子組換え稲の研究開発、薬学博士

profile

廣瀬 咲子 (ひろせ さきこ)

1987年～1989年 農林水産省森林総合研究所特別研究員
 1997年～2009年 農業生物資源研究所特別研究員
 2009年 農研機構作物研究所主任研究員
 専門は遺伝子組換え稲の機能性評価、理学博士

profile

川岸 万紀子 (かわぎし まきこ)

1994年 アメリカ合衆国National Institutes of Health 博士研究員
 1997年 農林水産省農業研究センター研究員
 2001年 農研機構作物研究所主任研究員
 専門は稲の生殖過程の分子生物学研究、理学博士

profile

川口 健太郎 (かわぐち けんたろう)

1988年 農水省入省、北海道農業試験場研究員、主任研究官
 2005年 農林水産省農林水産技術会議事務局国際基準専門官
 2007年 農研機構作物研究所上席研究員
 専門は麦類を中心とするイネ科作物の耐湿性研究及び遺伝子組換え作物の環境影響評価、農学博士

profile

安倍 史高 (あべ ふみたか)

2003年 農研機構作物研究所任期付研究員
 2008年 農研機構作物研究所主任研究員
 専門は小麦の遺伝子組換え技術に関する研究、農学博士

profile

藤郷 誠 (とうごう まこと)

2001年 農研機構東北農業研究センター研究員
 2009年 農研機構作物研究所研究員
 専門は大豆の遺伝子組換え技術に関する研究、農学博士

profile

西澤 けいと (にしざわ けいと)

2004年 農研機構北海道農業研究センター博士研究員
 2008年 農研機構作物研究所任期付研究員
 専門は遺伝子組換え技術を利用した大豆耐湿性研究、農学博士