

遺伝子組換え技術の農作物への利用に関する これまでの情勢と 2008 年における動向

川口健太郎・安倍 史高

抄 録

世界の遺伝子組換え作物の栽培面積は 2008 年には 1 億 2 千万 ha に及ぶこととなった。現在、商業栽培のない日本においても、実用向け遺伝子組換え作物の研究開発方針が農林水産省に設置された検討会により作成され、わが国の遺伝子組換え技術の利用に関する転機となった。折しも、世界の食料需給や食品の安全性に対する不安を背景に農業への注目度が高まっており、今後の遺伝子組換え技術の日本農業への活用方策を考える絶好の機会と考えられる。遺伝子組換え作物の開発にあたっては、遺伝子組換え技術の利点と限界を見極めつつ、安全性の議論を含め、国民との対話の下で推進することが重要である。

キーワード：遺伝子組換え技術、遺伝子組換え作物、研究開発、環境安全性、生物多様性
影響評価

平成 21 年 3 月 30 日受付 平成 21 年 8 月 19 日受理

本報告は、生研センターイノベーション創出事業の一環として取りまとめたものである。

Current situation of research, development and safe use of genetically modified crops in 2008

Kentaro KAWAGUCHI and Fumitaka ABE

Abstract

The cultivation area of genetically modified (GM) crops in the world reached 120 million ha in 2008. In the same year, the Japanese government planned and reported a new strategy for research and development of GM organisms (GMOs) for practical use. The year 2008 should be recognized as the turning point for research using GMOs in Japan because there has been little progress toward the commercial cultivation of GMOs in Japan. Because Japanese people's concerns about the demand for and supply of food in the world and about food safety for human health are increasing, some activities have been started to secure the safety of the food supply. Therefore, it is a very good time for people to consider how to use GMOs to contribute to the agricultural industry and farmers' interests in Japan. In the procedures for the development of GMO in Japan, it is important to recognize both the usefulness and limitations of GM technologies and discuss the issues regarding their safe use through improved communication with people about GMOs.

Key Words: gene recombination technology, genetically modified crops, research and development, environmental safety, biological diversity risk assessment

I はじめに

遺伝子組換え技術は大きな可能性を秘めた技術として期待され、日本では長年の研究蓄積があり、世界でもトップレベルの水準を有するものの、農業分野への応用面については、栽培品種の育成を目的とする作物育種プログラムではほとんど利用されておらず、また、遺伝子組換え作物の商業栽培はまったくない状況が続いている。一方、世界の遺伝子組換え農作物の栽培面積は主要な農作物輸出国を中心に1億2千万ヘクタールを超え（ジェームス 2008）、食料純輸入国である日本にとってその存在はもはや特別なものではなくなっている。最近の日本の食料事情をめぐっては、主要農産物の価格が高騰し国際的な食料不安があるなかで（樋口修 2008）、海外への食料依存度は依然として高く、また、輸入食品による健康被害の発生や事故米の不正規流通の実態が明らかとなるなど、量と質の両面から食の安全保障の問題がクローズアップされている。一方、このような状況は、消費者にとって、より安全な食品を求めて国産農産物を選択し、さらに自国の農業を見直す契機となって食料自給力及び自給率向上の取組み

の活発化へとつながっており（農林水産省総合食料局食料企画課 2008）、将来の食料不安を解消すると期待される遺伝子組換え作物の立ち位置を改めて捉え直すよい機会であると考えられる。

2007年5月には、農林水産省に、産、学、開発、消費流通、報道からの委員で構成された「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」が設置され、今後の遺伝子組換え作物の研究開発方向が検討されてきた。2008年1月に報告された最終取りまとめでは、現状の解析、推進方針と共に、5年を目途とした実用化にかかる工程表を含む具体的プロセスが示されており、本格的な利用にむけた大きな流れが形成されることとなった。このようなタイミングをとらえ、本稿では、農業、食、及び遺伝子組換え作物を巡る国内外の情勢を概観し、遺伝子組換え技術の特質を考えるとともに、国民が不安感をもつ遺伝子組換え生物の安全性の考え方の一端を紹介する。作物開発を中心とする農業研究にとって重要な遺伝子組換え技術の理解の一端となれば幸いである。

II 遺伝子組換え作物の利用状況

1 世界で拡大する遺伝子組換え作物の栽培

1980年代より試験栽培を続けてきた遺伝子組換え作物が、初めて商業栽培に至ったのは1994年のこと、5月18日にFDAの認可が下り5月21日にシカゴ及びカリフォルニア・デビスで販売された、カルジーン社の開発した成熟遅延性トマト「フレーバーセーバー」であった。10以上の隔離圃場試験とカリフォルニア、フロリダ、メキシコ地域というトマトの主産地で160ヘクタールを越える栽培面積を

有した（Kramer and Redenbaugh 1994）。その後、遺伝子組換え作物は現在に見られるように大面積で栽培されるようになるが、その発展の経過は遺伝子組換え作物栽培に関する唯一の調査機関ともいえる国際アグリバイオ事業団（ISAAA）から1997年から毎年出版されている年次報告に詳しい。1996年頃にはタバコ、ワタ、ダイズ、トウモロコシ、ナタネ、トマトの栽培があり、合計で数百万ha規模であった。その年から数えて13年目の2007年には栽培面積は拡大の一途をたどり1億1千4百万ha、栽培国数は23カ国と報告されている（James

2007)。これは世界の耕地面積約6億6千万haの約17.3%であり、同年の日本における約465万haの約24.5倍である。作物の種類としてはダイズ、トウモロコシ、ワタ、ナタネで遺伝子組換え作物栽培面積の99%を占め、国別では米国（遺伝子組換え作物栽培面積5770万ha／耕地面積1億5600万ha）、アルゼンチン（1910万ha／2828万ha）、ブラジル（1500万ha／5860万ha）で全体の約8割の面積を占めるが（James 2007）、これら3国は、主要農作物であるダイズ、トウモロコシの輸出シェアの90%以上（輸出額ベース）を担っている。ダイズとトウモロコシは油料、飼料用として大面積で栽培される作物であり、除草剤耐性（HT: Herbicide Tolerance）及び害虫抵抗性（IR: Insect Resistance）を付与されたが、これら2つの形質は大規模栽培をする上でのコスト減に寄与する形質である。

ISAAAの報告は遺伝子組換え作物利用の規模が大きいメガカントリーを中心にその拡大路線を照らし出しており、そのような見方に立てば、遺伝子組換え技術は単に育種技術の一つであって、その技術を用いて作出された遺伝子組換え作物の栽培規模拡大の経過は特別な出来事ではなく、作出手法を問わず、優秀な新品種の普及面積が拡大していくという出来事と同じであると考えられる。

一方、栽培面積の拡大のみに着目するのではなく、遺伝子組換え作物を取り巻く状況は国ごとに異なっているということにも注意を払う必要がある。なぜなら、各国の歴史・社会的背景、自然条件、経済状況が異なれば、遺伝子組換え作物を利用する意図も国ごとに特徴が現れると考えられるからであり、日本における遺伝子組換え作物の利用方針について検討する際に重要な情報になると考えられる。

例えば、ヨーロッパ諸国は遺伝子組換え作物の導入に前向きでなかった経緯があるが、それでも近年、栽培国、栽培面積ともに増大しているという。2007年にはスペイン、フランス、チェコ、ポルトガル、ドイツ、スロバキア、ルーマニア、ポーランドの経営規模の比較的大きな

地域を中心に害虫抵抗性トウモロコシが飼料用に栽培された。上記8カ国合計で10万haほどの栽培面積で、米国等における栽培面積には遠く及ばないが、このうち特にスペインで7.5万haと比較的大規模に栽培されており、これにはヨーロッパアワノメイガの被害が深刻な地域のニーズがあったこと、飼料利用として地域限定された流通により消費されたことなどの要因があり、欧州における数少ない栽培経験をもとにした安全性評価も行われ、悪影響が認められないことが報告されている（Eizaguirre 2006）。

アジアの国々においても遺伝子組換え作物の栽培の取り組みを進めており、栽培国はインド、中国、フィリピンで、栽培作物はインド、中国では主に害虫抵抗性ワタ、フィリピンでは害虫抵抗性トウモロコシであり、米国で開発された作物を導入している。

2 遺伝子組換え作物がもたらす効果

遺伝子組換え作物のメリットは何かと尋ねられた場合、その答えは、当然のことに改変された形質によって異なるため、簡単に答えることができない。従って、ほとんどのケースで、実績のある除草剤耐性、害虫抵抗性の形質を付与された遺伝子組換え作物がもたらす効果が示されることが多い。これら作物は、除草や害虫防除の手間を省くことで生産コストを削減する、土壌流亡を防ぐなど、農業生産面でのメリットが大きい第一世代の遺伝子組換え作物である。

たとえば、2006年の米国農業における遺伝子組換え作物の導入効果は、収量は352万トンの増加、生産コストは19億ドルの低減、経済効果は26億ドル、殺虫剤の使用削減量は4.99万トンと算出されている（Johnsonら 2008）。また、1996年から2006年までの世界規模の効果として、農家レベルでは69.4億ドルの利益があり、11年間の各効果の合計は338億ドルという。11年間での殺虫剤散布量は、有効成分で7.9%の低減、殺虫剤、除草剤使用にかかる環境負荷は15.4%の低減、温室効果ガス

放出の低減として、656 万台の自動車を削減したのに等しいという推定もある (Brookes and Barfoot 2007)。

このように、遺伝子組換え作物のメリットを数値でわかりやすく表すことは重要であるが、実際の効果は、ある程度の規模で栽培されて初めて計算が可能となるものであり、商業栽培がなされていない日本では、遺伝子組換え作物のメリットを実例に基づいて具体的に示すことが困難となっている。一方、機能性成分濃度の向上するものや、土壤中に含まれる有毒物質を除去する等の環境修復機能を有するものなど、経済コストなどの数値だけではなく、一般の人にもわかりやすい効果を持った遺伝子組換え作物が開発途上にある。

3 日本における遺伝子組換え作物を用いた製品の市場

日本では遺伝子組換え作物の栽培はされていないものの、その製品を扱う市場規模は年々増加している。2008 年の医療、医薬品などを含むわが国のバイオ産業の市場規模は 2 兆 8488 億円、このうち遺伝子組換え技術を用いて製造した製品では 2 兆 1934 億円と推定されるなかで、その市場の伸びの大部分を占めているのは農作物分野となっている (日経バイオテク 2009)。これは、次に挙げる 5 種の遺伝子組換え作物の輸入によるもので、2007 年と 2008 年における市場規模はそれぞれトウモロコシ [4126 億円 (2007 年) → 8075 億円 (2008 年) 以下同]、ダイズ [1597 億円 → 2116 億円]、ナタ

ネ [952 億円 → 1334 億円]、ワタ [40 億円 → 159 億円]、カーネーション [6.5 億円 → 8 億円] で、前年に比較して合わせて約 5000 億円の拡大と算出されている。この中で特に市場の伸びが著しいのはトウモロコシである。トウモロコシは、家畜への飼料利用に大幅に輸入量が増加しており、輸入穀物の第一位となっていることに加え、後述のように近年の穀物価格高騰もトウモロコシ輸入額の上昇に拍車をかけている。また、トウモロコシは 2000 年頃までは、ダイズやワタなどに比較して米国でも遺伝子組換え作物の比率が低く推移していた (30% 以下) が、除草剤耐性に加えて 2002 年に害虫抵抗性品種が使用可能となり、さらに 2004 年に除草剤耐性と害虫抵抗性の両方の特性を併せ持つスタック品種の登場により、2008 年には遺伝子組換えトウモロコシの比率が約 80% に達したことも大きな要因と考えられる。

このようにわが国のバイオ産業の市場にとって重要な農作物分野だが、1 つの問題点としては、すべて海外で生産されての輸入利用であり、国内農業を利活用できていないことであろう。これだけの市場規模ともなると、農業利用への魅力は高まる。現在、広く利用され効果に実績のある除草剤抵抗性、害虫抵抗性の形質を持つ遺伝子組換え作物を日本向けに開発し、利用することも一つの手であるが、国内農業の特長を活かすことのできるオリジナルな遺伝子組換え作物の形質を見いだすことも、国内耕地を利用した農業の活性化のために重要と考えられる。

III 世界および日本の農業問題

1 世界的な食料問題

遺伝子組換え作物の開発方向に影響を与える食料を巡る動向に注意を向けてみると、まず、世界的な食料不安があげられる。近年、世界の主要農産物の国際価格が高騰しており、その傾

向は小麦、トウモロコシ、大豆では 2006 年秋頃、米は 2007 年秋頃から始まった。経済的な視点からみた価格高騰の原因は、穀物市場への投機資金流入もその 1 つだが、1) 新興国発展: 中国やインドなどの新興国の経済発展による人口の増加とライフスタイルの変化に伴う食料需

要の増大、2) エネルギー問題：バイオ燃料の原料という食料以外の需要の世界的な増大による食料との競合、3) 気候変動：人間の経済活動で排出される温室効果ガスによる地球温暖化など、という中長期的に継続する構造的要因にあり、また、輸出国が自国の需給バランスを適正化するために輸出規制をかけることの影響もあるとされている(柴田明夫 2008)。このうち1) と2) の原因は正に人間活動そのものであり、消費量の増大に対し、さらに収穫量を上げられる品種の開発により、供給量を満たしていく努力が必要となっている。米国では、ブッシュ前大統領が2007年1月当時の一般教書演説で2017年までにガソリン消費量を20%削減するとともに、年間350億ガロン(1億3249万キロリットル)のバイオエタノール等再生可能燃料使用を義務づけると表明した。これにより、米国のトウモロコシはエタノール生産用の需要が拡大し、価格高騰の原因となると同時に輸出用トウモロコシの確保が問題となるとされたことから、遺伝子組換え技術により生産量を2倍にして対応するという方針を掲げていた。

3) は人間活動から影響を受けるものの、地球規模の気候変動に対しては現在の科学技術では人為的コントロールが不可能である。それに対応した技術的な対処策として、環境耐性の高い品種の開発が望まれることになる。オーストラリアでは2006/07、2007/08年に干ばつの影響で2作連続の不作に陥り、小麦の収穫量はそれ以前の過去10カ年平均が2200万トンであったのに比較し、この2年は1200万トンと50%台に落ち込んだ。同国では、これ以前の1994/95、2002/03にも干ばつの影響で半年の半分程度の収穫量という不作があり、生産が不安定の傾向がある。2年連続干ばつの危機的状況に遺伝子組換え技術での対応を検討しており、乾燥耐性形質をもつ遺伝子組換えコムギの研究を進め、また、1996年よりすでに栽培されている遺伝子組換えワタに加え、長年の議論があった遺伝子組換えナタネに関しても2007年にビクトリア及びニューサウスウェールズの2州での商業栽培禁止措置が解かれている。

2 日本農業の状況

日本の農林水産業の状況に関して、石破茂農林水産大臣は2009年の年頭所感の冒頭で触れ、次のように述べている。「率直に申し上げて、まさしくわが国の農林水産業は存亡の危機にあると感じております。生産額は減少の一途を辿り、就業者の高齢化はきわめて深刻な状況にあります。農地や山林の荒廃、漁業資源の深刻な状況、そして農産漁村の疲弊は目を覆うばかりという他はありません」(農林水産大臣 2008)。この内容を実際の数字で見ると、農・漁業生産額は、1985年(昭和60年)に16兆8380億円でピークを迎えた後、低下傾向に転じ2006年には11兆5060億円とピーク時の68%にまで減少している。(農林水産省大臣官房 2008)。農家戸数は昭和40年の566万戸から、2005年では285万戸へ半減、耕地面積は同じく600万haから469万haへ2割減となっている。基幹的農業従事者のうち65歳以上の割合は57.4%となり、カロリーベースの食料自給率は40%、耕地利用率は93.4%に低下し、耕作放棄地面積は38.6万haにも上っている(食料・農業・農村白書 2008)。

食料の安定供給は国の重要な責務であり、このために、国内農業資源の確保、輸入食料の安定確保、主食用飼料用穀物の備蓄、食料自給力の強化が必要とされている。2008年12月2日には食料・農業・農村基本計画の見直しを行うとする資料「新たな食料・農業・農村基本計画の策定に向けて」が公表された。ここでは、国内農業基盤の確保と持続可能な農業の確立による食料自給力の強化が挙げられており、おおむね10年後において、食料自給率50%(カロリーベース)を達成するとした場合の具体的イメージとして、生産面においては耕作放棄地の解消や優良農地の転用抑制により最大限確保した農地を、裏作を含めて最大限活用し、「水田フル活用」により、米粉や飼料用米等の新規需要米の本格生産に加え、自給率の低い麦(裏作麦)・大豆や飼料作物の生産拡大の取り組み強化が示されている。なかでも、水田裏作における麦類

の作付けは 5 万 ha (2007 年度) から、おおむね 10 年後 36 万 ha への拡大が検討されている。2010 年までに新たな基本計画を決定することとなっているが、実現に向けては、農地・農業用水、担い手、技術の確保を含め、実現可能性や国民負担なども含めて詳細な検討が行われるはずである。

このような農業実態に直面している現在、農業、農村の活性化に向けて、技術面では公的研究機関が新しい品種と農業技術の開発を中心とした取り組みを続けており、その役割の 1 つとして期待されるのが、これまでのゲノム研究の成果を遺伝子組換え技術の利用を通じて農業に還元するという点であろう。

3 日本における遺伝子組換え研究開発の推進方向

農林水産省は「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」における計 9 回の検討を経て 2008 年 1 月に最終取りまとめを公表、これからの遺伝子組換え作物研究に関する大きな方針を打ち立てた (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 2008)。イネゲノム解読を経てポストゲノム時代に突入し、ゲノム情報の農業への有効利用が期待されているが、その 1 つの出口が、遺伝子組換え作物の実用化である。

取りまとめでは、遺伝子組換え技術により新規形質を付与された農作物の開発により、地球規模の食料・環境・エネルギー問題の解決という政策目標達成への貢献への期待が述べられるが、一方、この技術は単に目標達成のための手段の 1 つであること及び技術としての限界があることを認識し、目的に応じて技術の位置づけを適時明確にする必要があるとし、従来の「砂漠で農業ができます」という表現に代表される万能主義的な考え方からは一線を画している。また、本技術を最終的に受け入れるか否かは国民の選択に懸かっていることを明確にしており、このためにも遺伝子組換え技術に関する正確な情報をできるだけわかりやすく説明するこ

との重要性を主張している。

現状の技術開発レベルの認識としては、イネゲノム研究の成果により、技術を農業上に活用するための基礎的条件は整ったとしながら、次のステップである遺伝子組換え農作物の実用化に生かし切れていない実態を分析した結果、見えてきた課題として、実用化を最終目標とした場合に必要とされる、開発目標及びユーザーの設定、開発手法の選択、知的財産権の処理、普及手段、さらには安全性評価の実施、社会の受容にむけた活動などまで、首尾一貫した総合戦略が必要なところ、現実には個々の研究者レベルでの検討にとどまり、研究組織レベルでの有効な議論が実施されていないことを指摘している。また、民間主導では実現が困難な研究開発領域は国が強いリーダーシップを発揮し、わが国独自の遺伝子組換え農作物の実用化に向けた研究開発の方針を示す必要性を述べている。

本方針の項目の中で示されていることは、限られた予算や人的資源の下で研究を進めていく上での、選択と集中による研究の重点化を図る必要性である。重点化により遺伝子組換え技術を活用すべき研究の要件は、消費者・生産者ニーズを踏まえた政策が存在すること、遺伝子組換え技術の利用が目的達成に必要不可欠なこと、実現可能性があること、コストバランス (費用対効果) が適切であることであり、最終的には生産者に安心して栽培され、国民に安心して消費してもらえる遺伝子組換え作物であることが重要としている。

以上の論点から絞られた重点分野として、短中期的には、減農薬が期待できる複合病害虫抵抗性農作物、国際貢献が期待できる不良環境耐性農作物、機能性成分を含有する高品質農作物、中長期的には、食料自給率向上に貢献できるような多収飼料作物、環境修復作物、エネルギー生産用作物などが挙げられている。

取りまとめでは、遺伝子組換え作物の開発は国が主導して推し進めることを明確にした意義は大きい。一方、遺伝子組換え作物の利用についての最終的な判断は、国民に投げ懸けられている。科学的に大丈夫だからとか、世界で大面

積で栽培された遺伝子組換え作物による生産物を既に大量に輸入利用している現実を受け入れるべき、というだけの論理で国民を説得するのでは国内における遺伝子組換え作物の実用化の

道は遠いのではないだろうか。公的研究機関は日本独自の、国民に喜ばれる作物の開発を進めつつ、国と連携して説明責任を果たすことがますます重要になろう (東條功 2007)。

IV 遺伝子組換え農作物がもたらすもの

1 遺伝子組換え技術の利点と限界

自然界において生物は遺伝子を組換えている。これまでの育種は、自然界で一般に見られる生殖細胞で生じる遺伝的組換えによって生じる形質発現の変化を利用してきた。また、放射線や化学物質等によって生じる遺伝子の変化が、突然変異形質として観察されることも利用してきた。しかし、これらの変化は偶発的なものであった。一方、遺伝子組換え技術の特徴は、偶発性に頼らずある程度意図的に遺伝子を組換えることができる点にある。これは、遺伝子を構成する核酸の物質的特性が理解され、生化学的な手法を用いて加工する技術が発達したことや、遺伝、形質発現における生物機能の理解が進み、遺伝子発現のメカニズムが生物に共通であることが分かったことにより可能となった。この特徴のため、従来の育種法と比較して次のような利点があると言われてきた。1) 計画性: 目的の形質と遺伝子の対応関係が明白で、確実かつ計画的な品種改良が可能、2) 遺伝子利用幅の拡大: 種を越えて有用な遺伝子を利用することで、農作物の改良の範囲を大幅に拡大できる、等である。このような利点を活かすことにより、遺伝子組換え技術は品種改良のスピードアップを可能とする技術として育種に応用することで、地球環境の悪化を防ぎ、食料問題を解決するというように期待されてきた。

しかし遺伝子組換え技術も万能ではなく、これまでにあった技術が不必要になるわけではないし、一つ一つの技術には得手不得手がある。

従来技術で生まれてきた優良品種は、優良な遺伝子を集積した生きた遺伝子共同体でもある。多くの遺伝子のネットワークにより維持さ

れているような形質発現の場合、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行くことは現在の技術では不可能に近い。

現状の遺伝子組換えが得意とするのは、単純な1遺伝子で形質が発現するような場合である。1例として、除草剤耐性を挙げる。まず、モンサント社の開発したラウンドアップという商品名の除草剤は、その有効成分であるグリホサートが、植物に必須のアミノ酸合成系の一つシキミ酸代謝に関わる酵素 EPSPS (5-エノールピルビルシキミ酸-3-リン酸合成酵素) を阻害し、芳香族アミノ酸の生産ができなくなるため、植物は枯れる。モンサント社開発陣は土壌細菌アグロバクテリウムが有していたグリホサートに阻害されない酵素 CP4 EPSPS を発見し、これを作物に導入しラウンドアップレディ (RR) を開発した。CP4 EPSPS を持つ作物はグリホサートにさらされても通常通り芳香族アミノ酸を合成できるため、除草剤がかかっても枯れない仕組みである。一方、リバティリンク (LL) という除草剤耐性作物は、ヘキスト社の開発した除草剤有効成分グルホシネートをアセチル化修飾することにより不活化することで枯れない仕組みを持つ。グルホシネートは、植物のグルタミン酸合成酵素を阻害し、必須アミノ酸を合成できなくなると同時にアンモニアが蓄積するため植物は枯れる。LL作物には、グルホシネートを特異的にアセチル化し、不活化するフォスフィノトリシンアセチルトランスフェラーゼ (PAT タンパク質) の遺伝子を導入している。RRは除草剤の標的酵素の感受性喪失、LLは除草剤有効成分の解毒というワンステップで除草剤耐性という目的を達している。これは、植物が独自にもつアミノ酸合成系がどのよ

うに働いているか、除草剤有効成分がどのように作用するのかという分子レベルでの知見が蓄積されていたこと、つまり「目的の形質と遺伝子の対応関係が明白」である場合に有効な作物が作出されるという良い例である。現状の遺伝子組換え技術では単純系を扱うことを得意としている。技術が原理的に持つ、形質の計画的導入、利用可能遺伝子の範囲拡大、短期改良が可能というメリットはまちがっていないが、その利点が十分に発揮されるには、目的の作物形質がどのようにして分子的に成立しているのかという知見を得ておくことが重要であり、さらに、改良に必要な有用遺伝子情報の蓄積及びその発現制御技術の確立など、周到な準備が必須であることを理解しなければならない。

前章に記載した「取りまとめ」において、遺伝子組換え作物開発における重点化によりいくつかの開発目標が示されたが、今後多くの研究がその後に続く予定となっている。その際には、農業研究の歴史で残されてきた未解決の農業課題を、革新的な遺伝子組換え技術がブレイクスルーするはずだという期待があることから、従来の育種や栽培技術では対応不可能だった難関形質にも取り組むことになろうが、これらの形質は 1 遺伝子のみで改良で不良形質が優良形質となるような単純系ではないことが多く、遺伝子組換え技術だけで解決する問題ではない。長期的展望に立った、難関形質の発現に関する基礎的研究と、遺伝子組換え技術と従来育種技術との融合が必要と考えられる。

2 遺伝子組換え作物の安全性

ある物事のプラス面を活用するとすれば、同時にマイナス面への配慮と適切な対処が必要となる。遺伝子組換え技術には前項に述べたような利点がある一方で、この技術によって作出される生物は潜在的な危険を有するのではないかという懸念から、生物的安全性（バイオセーフティ）に関しては技術開発当初から国際的な検討が行われ、現在の安全性確保の取り組みにつながっている。安全性には大きく環境安全性と

食品安全性の 2 つがあるが、本報告では、環境安全性を中心に取り上げる。

最初の国際的な検討がなされたのが 1975 年に米国で開催されたアシロマ会議である。当時は、遺伝子組換え技術の使用により予期しない性質を持った生物ができ、さらには環境に対して悪い影響を及ぼすのではないかという懸念があり、各国で研究開発における使用を想定した物理的、生物的封じ込めを基本とした実験指針を策定し、自主的な規制により安全性を確保していた。その後、試験圃場など環境中への放出および規模の拡大を伴う産業利用が現実味を帯びてきた 1980 年代には、幅広く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）の場で各国のエキスパートによる検討が行われるようになった。議論における重要なポイントは、遺伝子組換え技術が持つであろう危険性を科学的に明らかにしようとする努力であり、その危険性はどのような原因で生じ、どのような種類のものなのかという点を客観的に提示しようとしたことである。ここから、遺伝子組換え生物が潜在的に持つ危険性についての認識および安全性評価の基本となる多くの重要な概念が生まれ、その後「生物多様性条約のカルタヘナ議定書」においても利用されることとなる。産業分野における遺伝子組換え生物の安全性の検討における最初の国際的な合意に基づく成果が、1986 年に公表された「Recombinant DNA safety considerations, Safety considerations for industrial, agricultural and environmental applications of organisms derived by recombinant DNA techniques」（OECD 1986）、通称「ブルーブック」であり、1993 年には「Safety considerations for biotechnology: Scale-up of crop plants」、通称「スケールアップ文書」が公表された（OECD 1993）。これは「フレーバーセーバートマト」が市販される 1 年前の出来事である。

これら文書が示している遺伝子組換え生物の安全性を考える上での重要な前提が 2 つある。1 つは、これまで交雑が不可能であった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。これは、遺伝子組換え生物の性質は自然界や従来 of 育種法で開発された中に見られる変異に比較して質的、量的に異なるということがあるかもしれないという考えから発している。もう1つは、遺伝子組換え技術は従来行われてきた伝統的な遺伝操作の延長にあるもので、遺伝子組換え生物は環境に対するどのような潜在的な影響力があったとしても、これまで野生種や栽培種を農業利用した際に観察されてきた効果と同じであり、生物はその作出方法が従来法か組換え技術かにかかわらず、同じ物理学的並びに生物学的な法則に支配されるとの認識である。これは、遺伝子組換え作物の安全性評価を行う際には、これまでにないまったく新しい種類の危険性を考慮することなく、従来 of 作物を使用する際と同様の方法で、環境に対し望ましくない影響が生じるかどうかを評価すればよいことを示して

いる。

同文書には、遺伝子組換え生物の環境安全性を評価する際の重要な情報として、遺伝子組換え生物の特性、新たに付与された形質、遺伝子組換え生物が導入される環境、遺伝子組換え生物の使用方法が挙げられ、また、環境安全性に関して注意すべきポイントとして、現在の生物多様性影響評価項目と関連の深い遺伝子の伝播、雑草性の他、組換え特性の影響、遺伝的並びに表現型的な変異性、生物的ベクターの影響、作業者の安全性が挙げられていた。

安全性確保のための基本制度整備を目的とした国際的検討には、早い時期から積極的に我が国からも専門家を派遣し貢献してきていたが、現在でもその活動は活発に行われており、安全性評価の国際的調和のため、今後予想される新たな特性を持つ組換え生物の開発への対応等の活動が、現在でも OECD やコーデックス委員会等において継続されている。

V わが国における遺伝子組換え作物に関わる安全性確保の取り組み

1 規制の下での安全性評価

スピードアップを可能にする裏側には、スピードを制御するための技術と管理の方法がある。新幹線は長距離の移動を容易にしたが、その裏側には車両や線路をベストな条件に保つ保守整備の技術と安全運行管理のシステムがあるように。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。安全性に関する疑問が常に投げかけられる遺伝子組換え食品や作物が、加工または飼料用の輸入農産物とはいえ日本で大量に受け入れられている要因としては、きちんとした安全性評価を行うことによりその

安全が確認された遺伝子組換え作物のみが利用できるシステムが法律に基づいて運用され、機能していることも1つの理由であろう(川口2007)。

わが国における遺伝子組換え生物の使用に際しては、通例カルタヘナ法と呼ばれる、「遺伝子組換え生物等の使用等の規制による生物の多様性の確保に関する法律」および関係法令に基づいて規制されている。本法律は、2003年9月11日に国際発効した国際協定「生物多様性条約のカルタヘナ議定書」の円滑な実施のために策定された国内法である。国際協定であるカルタヘナ議定書が、安全性評価の方法に関して触れているのはその15条 Risk assessment (リスク評価)であり、評価は議定書の付属書Ⅲの規定に従って科学的に適正な方法によって行うことが示されている。付属書Ⅲには、評価に当たっての一般原則、評価の方法、考慮すべ

き点等の重要な記述があるため、次項で改めて触れる。同議定書の 16 条 Risk management (リスク管理) では、作出された遺伝子組換え生物の最初の自然環境への放出に先立ち、評価を行うことを義務付ける措置をとるほか、生物の生活環または世代時間相当の期間、観察されるよう努めることなど、評価を行うべきタイミングや期間について定めている。カルタヘナ議定書に則り、わが国ではカルタヘナ法の下での生物多様性影響評価実施要領において、評価の方法を記述している。

2 生物多様性影響評価を行う上での基本的考え方

国際協定であるカルタヘナ議定書では、安全性評価の方法については付属書Ⅲに記載されており、(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っているかどうか、(b) 使用する環境の下でその影響が起こりうるかどうか、(c) その影響が起きた場合にどのような結果が生じるか、(d) 総合的な評価、という順番で行うこととされている。(a)、(b)、(c) にある「影響」について、わが国のカルタヘナ法の下での生物多様性影響評価実施要領では、遺伝子組換え植物の評価の項目として、3つの項目を生物多様性影響を生じさせる可能性のある性質に挙げている。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形質のことであり、生育の速度、植物体のサイズや種子数などが関係する。有害物質とは、主にアレロパシー効果を持つ物質のことである。交雑性とは、生殖細胞（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、稔性、交雑率が関係する。

次に、評価における重要な2つの原則に触れたい。1つは、評価は対照との間の相対評価であること。もう1つは、ケースバイケースの原則と呼ばれるものである。

相対評価に関する付属書Ⅲでの記述は、

「リスクは改変されていない受容体生物又は親生物が潜在的な受容環境において及ぼす危険との関係において考慮すべきである。」となっている。生物は、成長、代謝、生殖というような生物の特徴を示すことから、遺伝子組換え生物であってもそうでなくても、環境に対し何らかの働きかけを行う。よって、遺伝子組換え生物のみを取り上げて生物多様性に与えるであろう影響を評価するのではなく、同時に、組換えを行っていない生物が多様性に与えるであろう影響を同じように評価し、それらの相互比較をして相対評価を行い、遺伝子組換えをしたことによつてのみ生じる影響を見ることである。例えば、遺伝子組換え西洋ナタネの競合における優位性の評価を行う際には、非組換えの西洋ナタネの特性も同時に調べ、その違いを明らかにすることが基本である。ナタネ油の材料として輸入された遺伝子組換えナタネの種子がこぼれ落ち、道ばたや河川敷などで生育していることが報告されているが、このような攪乱地に生育する性質は非組換えナタネも同様に示す性質であり、このような場所での生育のみをもって生物多様性影響が生じているとは見なされない。

ケースバイケースの原則についての付属書Ⅲの記述は、「リスク評価は個々にその事例に応じて実施すべきである。必要とされる情報の性質および詳細の程度は、関係する改変された生物、その予定される用途及び潜在的な受容環境に応じて事例ごとに異なり得る。」となっている。遺伝子組換え生物が潜在的に有する危険性は、現実に生物多様性に影響を及ぼすかもしれないし、影響を及ぼさないかもしれない。影響が起こりうるかどうかは、その生物の特性、その使用法、その使用環境によって明らかに異なる。例えば、「遺伝子組換えトウモロコシ」を「日本」で「栽培」しようとする「ケース」で生物多様性影響評価を行う際に「交雑性」という観点では、わが国の自然環境の生物多様性を構成する生物種の中には、トウモロコシと交雑可能な生物種は存在していないと考えられる。このような「ケース」では、評価において交雑性に関する情報の必要性の程度は低い場合があ

る。しかし、上記ケースで、受容環境が「日本」ではなく「メキシコ」や「ニカラグア」であったならば、そこにはトウモロコシの起源種ともされトウモロコシと交雑可能な「テオシント」

が存在しており、この種の存続への影響が懸念されるため、「交雑性」に関する情報の必要性の程度は非常に高くなると考えられる。

VI 日本における遺伝子組換え作物の将来～国民参加

前章まで、遺伝子組換え作物利用の現状、直面する農業課題に貢献が期待できる遺伝子組換え技術の利点、及び、国民が不安感を抱く最も大きな原因と考えられている安全性の問題をとりあげた。世界の遺伝子組換え作物の存在感が増すなかで、わが国での利用の形態は輸入利用に限られており、作物育種プログラムには遺伝子組換え技術はほとんど利用されておらず、実用化試験に不可欠な圃場試験を行うことで難しくなっている。日本の遺伝子関連技術力は世界のトップレベルであるにもかかわらず、わが国農業の活性化のために利用できるチャンスが生かされていない現状は、国益を損ねているといえる。日本で遺伝子組換え作物が栽培利用されない理由については、一般に、遺伝子組換え技術に関する全体的な情報が不足する中であって、特にネガティブな情報の比率が高いこと、安全性に関する国民のコンセンサスが得られていないことが挙げられることが多い。

わが国においては、遺伝子組換え生物の使用にあたって守るべき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、食品安全性評価及び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。しかし、科学的に安全だと判断されているのだから受け入れるべき、あるいは、世界の食料情勢と遺伝子組換え作物の栽培状況及び穀物の純輸入国である日本の立場を自覚して、遺伝子組換え作物を受け入れるべき、という論理での押しつけではなく、

国民が納得のいく合理的根拠があることが重要である。国民は遺伝子組換え作物という商品のエンドユーザーであり、ユーザーの理解や意見なくしてはよりよい商品が生まれず、ユーザー不在では仕事に対するインセンティブも得られず、技術の発展も非常に困難である。

国民理解のために重要な活動はコミュニケーション事業であり、遺伝子組換え作物に関する正当な判断に必要な情報の提供に加え、できれば、研究開発段階からの市民参加型の検討が望ましいと考える。この際、どのような論点を中心として進めるのかということが問題になろう。筆者らの意見としては、遺伝子組換え作物は国内栽培すべきか否か（賛成か反対か）というような一般論を論点にするのではなく、個別具体的な論点とすべきと考える。それは、安全性の評価が、ケースバイケースで、どのような状況でどのような遺伝子組換え作物をどのように使用するかという条件の下に判断されるのと同様で、遺伝子組換え作物がもたらす効果は、その作物の特徴、使用の方法、使用する環境ごとに異なり、それらの情報がなければ、栽培することの意義についても判断できないと考えられるからである。より具体的かつ事例的な情報に基づき、意見交換することにより、実際の遺伝子組換え作物は、その姿形がみえない中で想像していたものとは異なり、かつて言われてきたような特別視すべき存在ではないことがわかってもらえることで、遺伝子組換え作物への国民のまなざしが転換する日が到来することを期待したい。

VII おわりに

食料の安定確保の政策目標を実現する手段として、技術が不可欠である。ここに、もの作り(作物開発)を通して遺伝子組換え技術の活用の機会がある。たとえば、筆者らは、わが国の水田転換畑で栽培される畑作物の生育において問題となっている湿害を克服するためのアプローチとして、遺伝子組換え技術を用いてのみなし得る新たな耐湿性作物開発の共同研究を開始した。その実現に向けては、(1) テオシントの通気組織形成能を導入したトウモロコシ準同質遺伝子系統(間野・大森 2008)を利用し、(2) 顕微学的サンプリングを可能にするレーザーマイクロダイセクション法(Nakazono ら 2003)と発現遺伝子の高速大量シーケンスに基づくトランスクリプトーム解析によって通気組織形成能に関与する遺伝子を単離し、(3) コムギに遺伝子導入することによって耐湿性に関わる

通気組織形成能の機能解明を行い、ひいては高度な耐湿性を有する畑作物を開発するという計画である。この新技術は、多湿環境における畑作物の生産能力を安定的に維持することから、多面的機能を持つわが国水田利用効率の向上、ひいては自給力の向上につながる事が期待されるとともに、今後、気候変動により危惧される世界の農業生産の安定化に寄与するようなイノベーションをもたらす可能性がある。

一方、国民は食卓に迫り来る遺伝子組換え作物にどのように向き合えばよいか、答えを探っている。遺伝子組換え技術がわが国の農業を通じて社会に役立つためには今後も議論が必要であり、上記のような試みを国民にわかりやすく説明しつづけ、安全性を含めた、技術の重要性に理解を得ていくことが重要となってくるであろう。

謝 辞

2008 年 9 月に作物研究所で開催された冬作物推進会議での「遺伝子組換え農作物の開発と研究への利用」と題した技術検討会において講師を務めていただいた、茨城大学農学部立川雅司氏、近畿バイオ橋本昭栄氏、農林水産省技術安全課田中淳一氏には貴重な情報を提供いただくとともに、本報告を執筆する端緒を与えていただいた。また、生研センターイノベーション課題において、イネ科作物の耐湿性に関わる

通気組織の基礎的研究で、筆者らと共同研究を行っている東京大学大学院中園幹生氏、農研機構畜産草地研究所間野吉郎氏及び同作物研究所小柳敦史氏には、遺伝子組換え技術により耐湿性を付与した新規コムギの作出を目指す中で、遺伝子組換え作物の研究開発に関して有用な議論を行う場を持つことができた。各氏に対し、ここに深く感謝の意を表する。

引用文献

Brookes, G. and P. Barfoot (2007) Global Impact of Biotech Crops: Socio-Economic and environmental Effects, 1996 - 2006. AgBioForum, 11, 21 - 38.

Eizaguirre, M., R. Albajes, C. López, J. Eras, B. Lumbierres and X. Pons (2006) Six years after the commercial introduction of Bt maize in Spain: field evaluation, impact

- and future prospects. *Transgenic Research*, 15, 1-12
- 樋口修 (2008) 穀物価格の高騰と国際食糧需給. 調査と情報, 第617号, 国立国会図書館, 1-11.
- 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 (2008) 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最終とりまとめ. (平成20年1月), 1-22. <http://www.s.affrc.go.jp/docs/committee/gm/top.htm>
- James, C. (2007) ISAAA Brief 37 - 2007: Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2007, 143pp.
- ジェームス, C. (2008) ISAAA 概要書 (Brief 39) 世界の遺伝子組換え作物の商業栽培に関する状況 (原題 ISAAA Brief 39 - 2008: Executive Summary. *Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2008*. の邦訳), 1-17.
- Johnson, S.R., Strom, S. and Grillo, K. (2008) Quantification of the impacts on US agriculture of biotechnology-derived crops planted in 2006. *National Center for Good and Agricultural Policy*, 1-15.
- 川口健太郎 (2007) 遺伝子組換え農作物の栽培に関する安全性評価技術の国際動向. 農林水産技術研究ジャーナル, 30, 5-9.
- Kramer, M. G. and K. Redenbaugh (1994) Commercialization of a tomato with an antisense polygalacturonase gene: The FLAVR SAVRTM tomato story. *Euphytica*, 79, 293-297.
- 間野吉郎・大森史恵 (2008) 植物の根に関する諸問題 [178]: テオシントを利用したトウモロコシの耐湿性育種. 農業および園芸, 83, 689-695.
- Nakazono, M., F. Qiu, L. A. Borsuk and P. S. Schnable (2003) Laser-capture microdissection, a tool for the global analysis of gene expression in specific plant cell types: Identification of genes expressed differentially in epidermal cells or vascular tissues of maize. *Plant Cell* 15, 583-596.
- 日経バイオテク編 (2009) 日経バイオ年鑑2009, 日経BP出版センター, 1176pp.
- 農林水産大臣 (2009) 平成21年年頭所感. 農林水産省HP http://www.maff.go.jp/j/nentou_syokan/index.html
- 農林水産省大臣官房情報評価課情報分析・評価室 (2008) 農業・食料関連産業の経済計算 (速報) (平成20年8月), 1-19. <http://www.maff.go.jp/toukei/sokuhou/data/keizaikeisan2006/keizaikeisan2006.pdf>
- 農林水産省総合食料局食料企画課 (2008) わが国の食料自給率: 平成18年度食料自給率レポート (平成20年2月), 64pp. <http://www.maff.go.jp/j/zyukyu/index.html>
- OECD (1986) Recombinant DNA safety considerations, Safety considerations for industrial, agricultural and environmental applications of organisms derived by recombinant DNA techniques, 74pp.
- OECD (1993) Safety considerations for biotechnology: Scale-up of crop plants, 40pp.
- 柴田明夫 (2008) 飢餓国家ニッポン. 角川SSC新書049 角川SSコミュニケーションズ, 189pp.
- 食料・農業・農村白書 (2008) 平成20年度版 食料・農業・農村白書, 時事画報社, 269pp.
- 東條功 (2007) 遺伝子組換え作物の新たな展開に向けた取り組み, 化学と生物, 4, 282-285.