

遺伝子組み換え技術の適正利用

清水, 隆

(出版者 / Publisher)

法政大学サステナビリティ研究教育機構

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

サステナビリティ研究 / サステナビリティ研究

(巻 / Volume)

3

(開始ページ / Start Page)

43

(終了ページ / End Page)

57

(発行年 / Year)

2013-03-31

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00008658>

<特集論文1>

遺伝子組み換え技術の適正利用

清水 隆

要 旨

現在、全世界では飢餓人口が9億人を突破し、食糧の安全保障が脅かされている。その原因の1つに穀物の反収増加率が鈍化していることがあげられる。食糧の増産を維持していくには、遺伝子組み換え技術など農業バイオテクノロジーの利用が有効であると考えられている。本稿では、まず遺伝子組み換え技術の概要を述べ、その安全性と生態系に対する影響について述べた。次に、食糧の増産に向けて遺伝子組み換え技術を持続的に利用していくための方策を考察した。とくに、遺伝子組換え技術の持続的利用を脅かすものとして近年問題視されている除草剤耐性雑草や殺虫タンパク質抵抗性害虫について述べ、これらの事例から技術を持続的に利用していく際に有効な教訓を得た。一方で、遺伝子組み換え技術を持続的に利用していくことは、この技術が「善いもの」であることを前提としているが、このことは自然科学の知見だけでは判断できない。この判断のためには、様々な専門性を持ち寄った学際的な議論が必要であると考えられる。以上のことは、遺伝子組み換え技術だけでなく、原子力発電などを含めた科学技術一般を持続的に利用していく上で必要な議論に普遍化することができると考えられた。そこで、科学技術を適切に利用するために専門家集団および専門家を含めた市民に求められることを考察した。

キーワード：遺伝子組み換え技術、科学技術利用の持続可能性

0 緒言

国際連合食糧農業機関 (Food and Agriculture Organization of the United Nations : FAO) (2011) の報告によると、2010年現在の世界飢餓人口は9億人を突破し、さらに増加を続けている。食糧不足状態の継続は紛争や戦争につながることもあり、社会の持続可能性に対する大きな脅威である (クリブ, 2010)。食糧問題には政治、経済、文化などの様々な原因が考えられ、食糧の安全保障のためには学問分野の垣根を越えた総合的な協力体制を確立する必要がある。このうち農

学・生命科学部門が貢献できることの一つとして、食糧増産を目指した取り組みが考えられる。しかしながら、近年、主要穀物の反収増加率は鈍化しており、食糧生産の増加は人口の増加に追いついていないのが現状である (FAO, 2011)。この原因として、農業研究部門に対する投資の減少、燃料や肥料価格の上昇があげられる。

1970年代にノーマン・ボーログ博士らが主導した食糧増産プロジェクト、いわゆる「緑の革命」は、投入肥料や水を高度に利用できる新品種を利用することで、飛躍的な穀物反収増加を実現した (ヘッサー, 2009)。「緑の革命」は多くの人々

<特集論文1>

を飢餓から救ったが、一方で、用いられた品種が多施肥多灌水を前提とした多投入型農業を必要としていたため、持続可能ではないとの指摘もある(シヴァ, 1991)。その理由として、化学肥料や化学農薬の生産には多くのエネルギーを必要とするが、今後長期にわたって十分な化石燃料を利用できる保障がないこと、多量に投入された肥料や農薬により土壌や水質が劣化し、多量の地下水くみ上げにより塩害が発生するなど環境負荷が高いことなどがあげられる。そのため、世界は食糧増産と低投入型農業を両立するという難題に取り組む必要性に迫られている。この難題解決のための1つの方策として、農業バイオテクノロジーの利用が有効であると考えられている(FAO, 2004)。その中でも遺伝子組み換え技術には、従来用いられてきた掛け合わせなどの育種法では導入できなかった形質を作物に付与することができ、さらに育種にかかる時間も大幅に短縮できるという利点がある。

これまで遺伝子組み換え技術を利用することで、農薬使用量が減少し、不耕起栽培が可能になるなど環境負荷の軽減が実現してきた。さらに今後は、栄養を強化した作物、肥料をより有効に活用することで収量を増加できる品種、耕作不適地でも生育できる品種の開発が期待されている。このように、遺伝子組み換え技術は食糧問題解決にむけた大きな可能性を持っている。この可能性を十分に発揮させるためにも、技術を持続的に利用することが必要になる。先にあげた『緑の革命』の新品種は、飢餓解消に大きく貢献したものの、持続可能であるとは言えなかったことになる。本稿では、遺伝子組み換え技術を持続的に利用するために必要な方策を考察することを通じて、科学技術一般を適正利用する方策を検討する。

技術の持続可能性を考える上で原子力発電の例は大いに参考になる。2011年、東日本大震災を原因とする福島第1原発の事故は、科学技術が利便性ととも大きな危険を内包していることを改めて明らかにした。さらに、その後に実施された計画停電は私たちの生活に大きな影響を与えた

が、このことは私たちの生活が科学技術に依存していることを実感させるとともに、特定の技術(この場合は火力発電と原子力発電)に大きく依存することの脆弱性を露呈した。2012年7月現在、原子力発電は安全点検を経て再稼働されることが決定しているが、このことに対する一部の市民の反発は大きい。再稼働に反対する主張の中では、政府、原子力規制委員会、あるいは電力会社の情報公開が不十分であることが指摘されている(小出, 2011)。また、地震や津波を含む自然災害を十分に予測することができないという指摘もある(安斎, 2011)。遺伝子組み換え技術は、開発当初から「人類に制御可能であるか」という観点から盛んな議論の対象になってきたが(天笠, 2000)、この様子は原子力発電についての議論と類似性があるように思われる。本稿では、遺伝子組み換え技術の適正利用を考察する際に、必要に応じて原発事故から教訓を得ることにする。

本稿では、まず遺伝子組み換え技術の概要を知るために、開発史とその現状について述べる。次に、「遺伝子組み換え作物が人体や環境に対して悪影響を与えるのではないか」という不安や、技術の持つ危険性についての議論を概観する。さらに、遺伝子組換え作物の持続可能性を損なう要因として、近年、報告が増加している除草剤耐性雑草問題や抵抗性害虫問題を取り上げる。これらの事例研究から、持続可能な食糧生産のためには、遺伝子組み換え技術を含む多様な技術を科学的な根拠に基づいて評価し、利用することが必要であることを示す。さらに、この考察は食糧生産のみならず、科学技術一般を持続的に利用することに対しても有効であることを述べる。

技術の持続可能性を議論する際に、持続することを目指す技術は「善いもの」である必要がある。本稿では遺伝子組み換え技術を有用性の高い「善いもの」と仮定して議論をするが、単に科学的な事実のみを並べても、善悪の判断はつかないと考えられる。そのため、本稿では、科学技術の持続可能性を考える際には研究者、生産者、消費者など様々な立場の人を含めた広範な議論が必要であ

ることを再確認する。

以上の議論から、筆者は持続可能な科学技術利用を目指す上で必要な3つのキーワードを提示する。すなわち、『健全な科学』『多様な技術の利用』『科学では決定できないこと』である。これら3つを理解する土台として研究者を含めた広範な議論が必要とされるが、そのためには『開かれた討論』『市民の自覚』『理科教育』が必要であることを指摘する。

1 遺伝子組み換え技術の原理

植物に対する遺伝子改変は、通常、①外来遺伝子の導入、②組織片からの個体再生、抗生物質等による選抜という手順を経る(図1)。これらの手順に関与する植物バイオテクノロジーは1970年代から盛んに研究されている(Datta, 2007)。

植物への外来遺伝子導入法には導入遺伝子を塗布した金粒子を植物細胞に直接打ち込むジーンガン法や細胞壁を除去した植物細胞(protoplast)の細胞膜に電気的なショックを与えることで小孔を生じさせ、そこから細胞内に遺伝子を導入する電気穿孔法(electroporation)などがあるが、現在主流になっている方法は、土壌細菌アグロバ

クテリウム(*Agrobacterium tumefaciens*)を用いる方法である(山口, 2003)。アグロバクテリウムはグラム陰性細菌であり、植物の根頭癌腫病を引き起こすことが知られている。この細菌に感染した植物体は組織の異常な肥大を起こしクラウンゴール(crown gall)とよばれる腫瘍状のこぶを形成する。クラウンゴールの形成過程は、現在までに詳しく調べられている。アグロバクテリウムはTi-plasmidとよばれる環状DNAを保有しており、植物に感染する際には、Ti-plasmidの一部配列が植物のゲノムに組み込まれるのだが、組み込まれるDNA断片上にはオーキシンやサイトカイニンなどの植物ホルモン合成酵素がコードされており、それらの植物ホルモンによって植物の異常な細胞分裂が誘導され、腫瘍塊が形成される(Pitzschke and Hirt, 2010)。1983年、Zambryskiら(1983)はTi-plasmidから腫瘍を引き起こす配列部分を除去し、かわりに外来遺伝子を組み込ませた改変Ti-plasmidを保有するアグロバクテリウムをタバコに感染させることで、タバコに抗生物質耐性を付与することに成功した。その後の研究により双子葉類、単子葉類を問わず様々な植物種に対してアグロバクテリウムを用いた遺伝子導入が可能になっている(Datta,

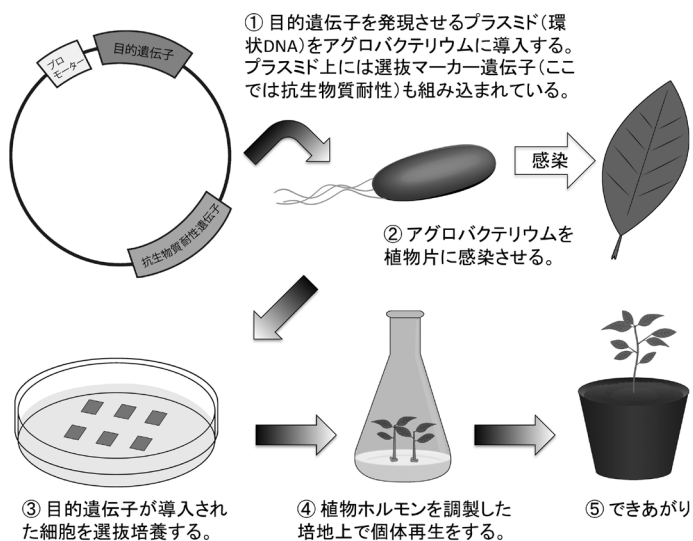


図1 遺伝子組み換え植物個体の作製過程(参考:大澤 江面, 2007)

<特集論文1>

2007)。

遺伝子導入をした組織片は個体再生されるが、その際、遺伝子導入をされた個体を選抜する必要がある。選抜マーカーとしては、従来カナマイシンなどの抗生物質に対する耐性を付与する遺伝子や除草剤耐性遺伝子が利用されてきた。しかしながら、耐性遺伝子が環境中に流出すると、抗生物質に耐性を持つ微生物や除草剤耐性を持つ雑草が生じる可能性がある。これまでに、そのような事例は報告されていないものの、生物学的に安全性の高い選抜マーカーが求められている。そこで近年、選抜後に不要になったマーカー遺伝子を除去する技術や、植物ホルモンやアミノ酸、糖要求性を改変させることで選抜をする技術が開発されている (Tuteja et al., 2012)。

遺伝子組み換え技術は1980年代に農作物へ応用され、現在では多くの遺伝子組み換え (genetically modified : GM) 作物が商業レベルで栽培されている (Basu, 2008)。

2 GM作物の現状

2-1 現在流通している GM 作物

2012年現在、GM作物の栽培面積は全世界で1億7000万haに達し、世界の耕地のうち約10%を占めている。さらに、その面積は年々増加している。北米大陸を中心に、EU、アフリカ大陸を含む28カ国で栽培されている (James, 2012)。栽培されているGM作物の多くはダイズ、トウモロコシ、ワタなどの油脂作物や飼料作物であり、中でも主流となっているのは特定の除草剤 (グリホサート Glyphosate、グルホシネート Glufosinate など) に対して耐性を持つ品種 (除草剤耐性品種) とアワノメイガ (European corn borer : *Ostrinia nubilalis*) など鱗翅目の食害虫に対する抵抗性を持つ品種 (害虫抵抗性品種) である。除草剤耐性品種や害虫抵抗性品種は「第1世代」とよばれるGM作物であり、主に生産者の利点が重視されている (ピンストラップ・アンダーセン, 2000)。これらの品種を採用すること

により、生産者は除草作業を軽減したり、除草剤・殺虫剤の使用量を減らしたりすることができる。いっぽうで、雑草害や虫害を軽減することで収量を安定させることができ、価格の安定にも繋がることで生産者のみならず消費者にも利点があると考えられている。

2-2 開発中の GM 作物

主に生産者の利点を重視した「第1世代」GM作物に対して、消費者や途上国の栄養飢餓状態の人々に対する利点を追求した「第2世代」GM作物の開発も進められている。一例として、ゴールデンライスをあげる。ゴールデンライスはビタミンAの前駆体であるβカロテンを、内胚乳 (食用に供される部位) で合成できるように遺伝子を改変したイネである。ビタミンAは欠乏すると、眼球の乾燥や免疫の低下をもたらす、途上国では約2億5千万人の子供がビタミンA欠乏状態にあり、そのうち年間約25~50万人が失明したり死亡したりしていると推測されている (Enserink, 2008)。Yeら (2000) は、スイセン (*Narcissus pseudonarcissus*) およびエルビニア属細菌 (*Erwinia uredovora*) から単離されたβカロテン代謝酵素をコードする遺伝子をイネに強発現させることで、従来βカロテンが合成されていなかった内胚乳で、βカロテンを合成させることに成功した。ゴールデンライスはその後改良が加えられ、βカロテン含有量が20倍以上強化されたゴールデンライス2が開発されている。国際イネ研究所 (2012) の発表では、2012年現在、2~3年以内に実用化されるとの見通しである。しかしながら、ゴールデンライスは開発から10年以上経過しているが、未だ実用化には至らず、実用化の見通しは先延ばしを続けている。この事態について、開発者の一人であるIngo Potrykus (2012) は、遺伝子組み換え技術に対して懐疑的な環境保護団体の存在と、それらの団体の運動の結果として、各国政府によるGM作物に対する規制が厳しくなっていることを原因に挙げている。近年、βカロテン強化トウモロコシ (Naqvia

et al., 2009) やコムギ (Cong et al., 2009) も開発されている。

2-3 健康・環境に対する影響

GM 作物は多くの利点を持ち、今後の食糧安全保障に不可欠な技術である一方で、食品として直接摂取されることや農作物として広範囲で栽培されることから、健康や環境に対する影響が関心を集めてきた。さらに、GM 作物が市場に導入された当初から、健康や環境に対する悪影響を示唆する実験結果が報道されている (ピンストラップ・アンダーセン, 2000)。健康に対する悪影響が主張された例としては、例①レクチンを発現させたジャガイモを食べさせたラットの免疫力が低下したとの報告が有名である。一方、環境に対する悪影響が主張された例としては、例②メキシコのトウモロコシ在来種から、遺伝子組み換え品種の由来の遺伝子やタンパク質が検出されたとの報告、例③害虫抵抗性トウモロコシの花粉を振りかけたトウワタを食べさせたオオカバマダラの幼虫が死んだとの報告が有名である。これらを含む多くの、悪影響を示唆する知見は科学的に検討されてきた。議論の推移については国際生命科学研究機構 (International Life Sciences Institute : ILSI Japan) (2010) により検討されている。また、白井洋一 (2012) は害虫抵抗性 GM 作物による生態系への影響についての研究事例を一覧表にまとめている。これらの文献を読む限り、GM 作物に対して提示されてきた疑念の根拠となる観察結果の多くは否定されている。例①では、対照実験の不備などが指摘され、例②では、試料に GM 品種の種子が混入していた可能性が指摘されている。また、例③では、実験室内で観察された条件が、自然界では実現する可能性が非常に低いことが指摘されている。これらは、遺伝子組み換え技術の安全性が、反証の提示とその検討の繰り返しによって評価されていった過程を示している。さらに、この過程では、健全な科学的手法を用いることが必要であることが分かる。このような取り組みは、今後も継続される必要がある。

現在、GM 作物の安全性評価は国際食品規格委員会による食品規格 CODEX に基づいて行われている。GM 作物は市場に出回ってから 18 年経過したが、明確な健康被害といえる報告は、筆者の知る限り存在しない。

2-4 1つ目のキーワード『健全な科学』

健全な科学的手法とは、具体的には何を指すのだろうか。ジャック・モノーは『偶然と必然』(1971) のなかで、

科学的方法は、〈自然〉は客観性をもっているという当然の仮定の上に置かれている。つまり、ある現象を最終原因すなわち《目的》の面から解釈することで《真実の》認識に到達できるという考えを、否定しようという体系的なものである。(渡辺格・村上光彦訳)

と述べている。このことを受け入れて考えると、「GM 作物は安全である (危険である)」ことを示すための議論は、健全な科学的議論ではないといえる。さらに、科学的な主張は、実証可能である必要があり (経験科学)、科学的主張には「反証可能性」が担保されていなければならない。カール・ポパーは『科学的発見の論理』(1959) の中で経験科学を体系的に進めるための最高基準として、

科学におけるいかなる言明をも反証にさらって弁護しないという方針にそって科学的手続きの他の諸規則が設定されなければならないことを命じる規則 (大内義一・森博訳)

を、挙げている。このことは、いかなる科学的主張も不変ではあり得ないことを示している。また、トーマス・クーン (1962) は、科学的な世界観 (パラダイム) が、しばしば転換してきた歴史を記述している。「反証可能性」が担保されるためには、主張の根拠となる証拠が検証・再現可能である必要があり、主張が確立された過程が明らかになっていなければならない。そのためにも、科学的な主張には十分な情報公開が伴われるべきである。東日本大震災を原因とする福島第 1 原発事故では、原子力発電を実行する立場、規制する立場

<特集論文1>

の双方に安全性に関する情報の隠蔽があったと感じている人が大多数であるという調査結果がある(東洋経済, 2011)。どの程度の隠蔽が存在したかは、現在さまざまな検証がされているが、実際に情報公開が不十分であったとしたら、原子力発電という科学技術を健全に利用していく上で深刻な瑕疵があったといえよう。

科学的主張について十分な根拠が公開されていても、その根拠が科学的に妥当であるかを判断されなければならない。その判断基準としては、「偏向性が排除されているか」、「必要な対照群が設定されているか」、「統計的に有意であるか」などが考えられる(Rutherford and Ahlgren, 1989)。逆にこれらの基準を満たしていない議論は、科学的には無意味であると判断される。これらの判断基準は、古くから体系的に確立されている。しかしながら、先に示したGM作物の安全性に対する議論の例でも分かるように、現在でもこれらの判断基準を満たしていない知見が報道され、議論されることがある。そのような議論は、専門家コミュニティの中で吟味され、排除されていくが、専門家ではない一般市民もまた、科学的主張の妥当性を自ら判断していく必要がある。

3 除草剤耐性品種利用の持続可能性

3-1 除草剤耐性品種の現状

GM作物の有用性については確立しつつあるが、一方で遺伝子組み換え技術の持続可能性を脅かす事態が生じている。除草剤耐性雑草の出現と殺虫剤抵抗性害虫の発生である。まずは除草剤耐性雑草について述べる。

これまでに、複数の除草剤について、それぞれに対する耐性を付与された作物が開発されている(Basu et al., 2010)。このうち、最も古くから、かつ広範囲に用いられているのは、グリホサートに耐性を持つ作物である。除草剤グリホサートは5-エノールピルピルシキミ酸-3-リン酸合成酵素(5-enolpyruvylshikimate-3-phosphate synthase: EPSPS)阻害剤で、植物体内で芳香

族アミノ酸(チロシン、フェニルアラニン、トリプトファン)などを合成するシキミ酸経路を阻害し、植物体を枯死させる。除草剤としては、1974年にアメリカ・モンサント社が「ラウンドアップ(Roundup)」の商標で販売を始めている。グリホサートは、植物種によらず除草効果を発揮する非選択性除草剤であり、土壌残留性が非常に低く、散布後速やかに分解されるなどの利点を持ち、発売以来広く用いられてきた。また、ほ乳類、鳥類、魚類に対して毒性が非常に低いという特性もある(Duke and Powles, 2008)。

グリホサート耐性作物は、アグロバクテリウムから単離された、グリホサートに対して感受性を持たないEPSPS遺伝子を植物体に導入することで得られた。アメリカ・モンサント社が最初のグリホサート耐性ダイズ(商標名:ラウンドアップレディ Roundup Ready)を開発して以来、現在までにトウモロコシ、ナタネ、ワタなどでグリホサート耐性作物が開発されている。グリホサート散布により耐性作物以外の雑草を非選択的に除去することができ、生産者の負担軽減が実現されたが、加えて、不耕起栽培が可能になり土壌の流出が抑制できたり、除草剤の使用量を減少させたりすることで環境に対する負荷を軽減させること可能になった。

除草剤と耐性作物の組み合わせは、その利便性から非常に広範囲で用いられている。例えばアメリカでは、ダイズ作付面積の約93%、トウモロコシ作付面積の約80%で除草剤耐性作物が栽培されている(National Research Council, 2010)。除草剤耐性作物を栽培する際には、用いる除草剤としては当該の除草剤1種類で充分であり、また、他の機械的除草(刈り取り、耕起など)が不要になる。その結果、1種類の除草剤が栽培期間中に繰り返し使用されることになり、耐性雑草の出現を促してしまった。

3-2 除草剤耐性雑草の出現

グリホサートは1974年の発売以来、広範囲で使用されてきたが、耐性雑草はほとんど問題にな

らなかった。その理由として、除草剤耐性作物の開発以前には、グリホサートは作物の播種前に繁茂していた雑草を一掃するため (burndown usage) に用いられてきたことが挙げられる (Powles, 2008)。作物播種後は、機械的除草や他の選択的な除草剤が使用された。グリホサートは土壌中では残留せず不活化するため、除草剤による選択圧は作物播種前に発芽した雑草のみに対してかかっていた。また、除草法の多様性が耐性雑草の出現を抑制していたと考えられる。グリホサート耐性作物の導入当時は、長年のグリホサート使用実績にも関わらず耐性雑草が問題になっていなかったことから、研究者の中にはグリホサート耐性作物の農地でも耐性雑草は問題にならないと考える人もあった。しかし、グリホサートの使用法が耐性作物の導入後に大きく変化したことから、耐性雑草が出現してしまった。現在、グリホサート耐性作物栽培地におけるグリホサート耐性雑草はアメリカ、ブラジル、アルゼンチンの少なくとも3カ国で報告されている。アメリカではイネ科、キク科、ヒユ科など8種以上の雑草について報告され、800～8000km²の耕地で問題になっていると推測されており、除草剤耐性作物の持続的な利用にとって大きな脅威となっている。さらに、グリホサート耐性作物栽培地以外でも、多年草作物耕作地、果樹園、道路脇などでのグリホサートの繰り返し使用により、耐性雑草が出現してきている。少なくとも12カ国でイネ科、キク科、オオバコ科などの雑草が問題になっており、グリホサートの効果や利便性を損ねている (Powles, 2008)。

グリホサート耐性雑草が持つ耐性のメカニズムは大きく分けて3種類あることが分かっている (Shaner et al., 2011)。1つ目は、グリホサートの標的分子である EPSPS の変異である。例えばアメリカヤエムグラ (goosegrass : *Galium aparine* L.) では、アミノ酸配列が変化した結果、グリホサート結合サイトが変化したり、分子構造が変化したりしてグリホサートとの結合が弱まってしまっていることが報告されている。2

つ目は、ゲノム中で EPSPS 遺伝子のコピー数が増加することである。コピー数が増加すると、EPSPS の発現量が増加し、結果としてグリホサートによる拮抗阻害効果が減少する。このように耐性が獲得された例としては、ボウムギ (rigid ryegrass : *Lolium rigidum* Gaud.) やイズハハコ属 (*Conyza* spp.) で報告されている。3つ目は、グリホサート輸送機構の変化である。グリホサートは葉面等に散布された場合、速やかに植物体に取り込まれ、茎頂や根端などの成長点に輸送されると考えられている。このような事例は、ボウムギやヒメムカシヨモギ (horseweed : *Conyza canadensis*) などで報告されている。詳しいメカニズムは明らかではないが、ヒメムカシヨモギでの研究では、散布されたグリホサートが液胞に輸送され、師部などへの移動が妨げられていることが報告されている。

1点、注意しなければならないことがある。これらの事例で、雑草がグリホサート耐性を獲得したメカニズムでは、耐性作物からの遺伝子流出が疑われてはいないということである。むしろ、耐性作物導入により、グリホサートに使用量が増大した結果、局地的にグリホサートの選択圧が高まって、耐性雑草が進化したと考えられる。耐性雑草の出現を防ぐためには、他の除草剤や機械的除草法の併用が必要であったと考えられる。このことから、グリホサート耐性作物利用の持続性を脅かしているのは、遺伝子組み換え技術そのものではなく、技術の利用法であるといえる。

現在、グリホサート耐性雑草対策として、グルホシネートや2,4-ジクロロフェノキシ酢酸 (2,4-dichlorophenoxyacetic acid : 2,4-D) などの、他の除草剤耐性作物の導入や機械的除草法の併用が考えられている。グルホシネートは、グルタミン酸にアンモニウムイオンが取り込まれグルタミンが合成される経路を拮抗的に阻害する。グルホシネートを散布された植物は、窒素同化や炭酸同化が阻害されてしまうため、枯死してしまう。グルホシネートは非選択的除草剤だが、土壌残留性がやや高いなどグリホサートと比べると劣る点

<特集論文1>

がある。2,4-D は合成オーキシンの1種である。オーキシンは最も古くから研究されている植物ホルモンで、植物細胞の増殖や植物体の形態形成に関わるが、近年、その応答経路が明らかになりつつある(清水, 2008)。植物体を高濃度の2,4-Dで処理するとその植物は枯死するが、枯死させるのに必要な濃度が単子葉類で高く、双子葉類では低いため、単子葉類作物(イネ、ムギ類、トウモロコシ)耕作地で、双子葉雑草除去に用いられている。いわゆる選択的除草剤である。ベトナム戦争では類似物質である2,4,5-トリクロロフェノキシ酢酸(2,4,5-trichlorophenoxyacetic acid: 2,4,5-T)との混合剤がいわゆる「枯れ葉剤」として用いられた。「枯れ葉剤」製造時に副生成物として混入したダイオキシン類が胎児の催奇性などを持っていたことから大きな社会問題に発展したことは有名である。しかしながら、2,4-D製剤は古くから除草剤として用いられており、定められた用法を守るかぎり安全に使用できる。グルホシネートや2,4-Dに対する耐性作物を導入したり、機械的除草をしたりすることはグリホサート耐性雑草対策としては有効ではあるが、グリホサートの持つ非選択性や土壌分解性などの利点や、除草剤散布の回数を減らし除草作業量を軽減する等の利点が損なわれることになる。

3-3 トウモロコシごま葉枯れ病

除草剤耐性雑草の事例から得られる、遺伝子組み換え技術を含めた農業技術を持続的に利用するための教訓は何だろうか。Powles (2008) や Shaner ら (2011) が指摘するのは、「1種類の除草剤に依存することの危険性」である。グリホサートの例では、その利便性から単品で繰り返し散布され、他の除草法が用いられなかった結果、耐性雑草の出現を促した。

このことは、除草剤だけに限らず、採用される作物種や品種、農法についてもいえることである。効率や経済性のみが重視されると、同一の作物種や品種が大規模に繰り返し栽培されることになる。その結果、特定の病害が蔓延したり、連作

障害があらわれたりして、農法の持続性が損なわれる。また品種の多様性が失われ、遺伝子資源が減少してしまう。例えば、1960年代後半にアメリカでは特定のトウモロコシ品種が大規模に栽培された時期があった。この品種はダブルハイブリッド(異なる雑種品種同士の掛け合わせ)と呼ばれる品種で、親株よりも雑種の方が生育旺盛になる、いわゆる雑種強勢を利用していた(朝日新聞経済部, 1983)。ハイブリッド品種を作製するためには自家受粉を防ぐ必要がある。そのため種子会社は、母親品種のトウモロコシから雄蕊を除去する作業(除雄作業)が必要になる。その手間を省くために花粉が稔性を持たない雄性不稔(male sterility)品種が利用された。1960年代に広く用いられたのはTexas型細胞質雄性不稔性(cytoplasmic male sterility)を持つCMS-T系統であった。この系統は、稔性系統では発現しない13 kDaのミトコンドリア膜タンパク質(URF-13)を発現する(Hanson, 1991)。このタンパク質は葯形成時にミトコンドリアを崩壊させ、花粉形成を阻害するが、同時にある種のごま葉枯れ病菌(*Cochliobolus heterostrophus*)に対する抵抗性も阻害する(Levings and Siedow, 1992)。そのため1970年にアメリカではごま葉枯れ病が蔓延し、大凶作となった。この事例もまた、効率が優先された結果、不測の事態に対して脆弱になってしまうことを示している。

3-4 2つ目のキーワード『多様な技術の利用』

以上の事例から得られた教訓は、「限定された種類の科学技術に依存することの脆弱性」と言い換えることにより、他の科学技術に対しても普遍化できる。東日本大震災後に実施された計画停電は、私たちの生活に大きな混乱をもたらした。電気という単独のライフラインに依存することの脆弱性を思い知らせることになった。多様なシステムに依存することで、不測の事態に対処できるようになる。一方で、近年、グローバル化の進行に伴い生産分野では国際分業が進んでいる(ギデンズ, 1990)。経済効率を優先させるためには、作

業の大規模化と単純化が不可欠であろう。このような方針は短期的には生産性を高めるだろうが、不測の事態に直面したときに脆弱であることを認識する必要がある。

4 害虫抵抗性品種利用の持続可能性

4-1 害虫抵抗性品種の現状

除草剤耐性品種とともに広範囲で用いられている GM 作物に害虫抵抗性品種がある。害虫抵抗性品種は、主に、トウモロコシ、ワタ、ダイズなどで導入されている。害虫抵抗性品種のうち、最も成功した例は真正細菌バチルス・チューリングェンシス (*Bacillus thuringiensis*) が産出する殺虫性タンパク質 (Bt toxin) を利用したものである。Bt toxin が鱗翅目、双翅目、鞘翅目等の幼虫に対して殺虫効果を持つことは古くから知られていた。Bt toxin の作用機作については、現在までに全容が明らかにはなっていないが、Bt toxin が昆虫の中腸表皮にある受容体に結合した結果、細胞接着因子である cadherin に異常が生じ、昆虫の中腸表面の細胞同士が結合できなくなってしまうと考えられている (Bravo and Soberon, 2008, Tabashnik et al., 2011)。Bt toxin を摂取した昆虫は腸表面に穴が開き、浸透圧ショックと細胞死が引き起こされ、やがて死に至る。Bt toxin が殺虫効果を示すためには昆虫腸内のアルカリ性環境下で分解される必要がある。ヒトを含めたほ乳類の腸内は酸性なので、Bt toxin はほ乳類に悪影響を与えないと考えられている。そのため、バチルス・チューリングェンシスの孢子および Bt toxin は生物農薬として有機農業等で広く用いられてきた。Bt toxin タンパク質をコードする遺伝子 (*crystal-like 1: cryI*) を植物体に導入するとその植物は Bt toxin を生産し、害虫抵抗性を持つようになる。

害虫抵抗性作物を利用することで殺虫剤の散布頻度や使用量を減らすことができ、特に毒性の高い殺虫剤の使用を大きく減少させることができる。また、虫害を抑制させることで収量を増

加させることができる。例えば、アメリカにおけるトウモロコシの主要害虫であるヨーロッパアワノメイガ (European corn borer: *Ostrinia nubilalis*) の幼虫は茎の随に穴を掘って潜り込む性質がある。そのため、植物体外から除草剤を散布しても効果は低い。これに対し、害虫抵抗性作物は組織内に Bt toxin タンパク質が蓄積するため食害を受けにくいという利点がある。害虫抵抗性作物の有用性は南アジア、東南アジア、アフリカなどの発展途上国で特に高いと考えられているが、これは、これらの地域で害虫の被害が多く、殺虫剤が入手しにくいためである (Qaim and Zilberman, 2003)。

4-2 殺虫剤抵抗性害虫

Bt toxin タンパク質に耐性を持つ害虫の出現は、害虫抵抗性作物の開発当初から懸念されてきた。そのため、アメリカ合衆国環境保護庁 (United States Environmental Protection Agency: USEPA) では害虫抵抗性作物の使用に際して High Dose / Refuge (HDR) とよばれる規定を設けている (Siegfried and Hellmich, 2012)。HDR とは、高濃度で Bt toxin タンパク質を発現する品種を用い、さらに、害虫抵抗性作物の栽培地に一定の割合で害虫抵抗性ではない作物 (Non-Bt 作物) を栽培することにより、害虫の避難所を設けるという考え方である。害虫の避難所を設けることで抵抗性害虫の発生を抑えるという考え方は、やや理解しづらいかもしれない。ある圃場で栽培されている作物のすべてが害虫抵抗性作物だった場合、殺虫剤抵抗性を獲得した個体が低頻度ながら生じると、Bt toxin タンパク質の選択圧によって有利に選抜されるため、数世代後には抵抗性害虫が繁茂することになる。一方で、Non-Bt 作物という避難所を設けた場合、Non-Bt 作物上では Bt toxin タンパク質に対して抵抗性を持たない個体が生育することができる。アワノメイガなどの害虫は圃場内で植物個体を移動するため、低頻度ながら生じた抵抗性害虫個体と大多数の抵抗性を持たない害虫個体が交

＜特集論文1＞

配することになる。ここで、遺伝的変異によってもたらされた抵抗性が劣性の形質であると仮定すると、生じたヘテロ個体は抵抗性を持たないことになる。結果として、抵抗性害虫の発達が抑えられることになる。実際、これまでの報告されている Bt toxin タンパク質抵抗性害虫は、Bt toxin タンパク質に毒性を付与する酵素の活性が低下していたり、Bt toxin タンパク質の受容体が欠損していたりするなど劣性の形質をもつことがほとんどである。HDR 規定が導入された当初は、避難所である Non-Bt 作物の収量が減少してしまうという懸念があった。しかし、アメリカ合衆国における経過観察により、害虫抵抗性品種を導入すると、近隣の Non-Bt 作物栽培地でも害虫の発生を抑制できることが判明した (Hutchison et al., 2010)。HDR 規制が徹底された結果、アメリカでは Bt toxin タンパク質耐性のトウモロコシ害虫は、大規模には発生していない (Siegfried and Hellmich, 2012)。

一方で、ワタについては Bt toxin タンパク質抵抗性害虫による被害が問題化している。例えば Tabashnik ら (2008) はアメリカ、オーストラリア、中国、スペインなどにおける抵抗性害虫の発生を報告している。この報告では、抵抗性発達の原因として、Non-Bt ワタという避難所の設置が不十分であったことが挙げられている。インドでは 2010 年に Bt toxin タンパク質に抵抗性を持つワタアカミムシ (pink bollworm : *Pectinophora gossypiella*) の発生が報告されている (Bagla, 2010)。インドでは害虫抵抗性ワタを政府が承認する以前から、いわば海賊版的に未承認の害虫抵抗性ワタが導入されていたという経緯がある。政府の承認後も農民たちは国際アグリ企業から種子を購入せず、自家採取した種子を用いて栽培を続けている (ウォールセン, 2011)。この事例には、知的所有権を保護する立場と遺伝子資源を保護する立場に分かれて利害が複雑に対立しているという背景もあるが、ここで問題にするべきは自家採種を続けていくと作物中の Bt toxin タンパク質の発現量が減少してしまうと考

えられることである。殺虫成分が減少した作物を栽培し続けると抵抗性害虫が発達しやすくなると考えられる。海賊版 Bt ワタはインド西部・グジャラート州を中心に栽培されているが、2010 年に抵抗性害虫が発生したのもグジャラート州である。このことから、抵抗性害虫の発生した原因として、Bt toxin タンパク質の発現量が減少したワタを栽培し続けたことを疑うのは合理的な推論であると思われる。国際アグリ企業が遺伝子に対して特許を取得し、害虫抵抗性種子を独占的に販売することに対して批判的な意見を持つ人々の中には、グジャラート州の農民が海賊版種子を使い続けることに対して好意的な意見を持つ人もいる。しかしながら、技術を持続的に使用するという観点から考えると、Bt toxin タンパク質の発現量が減少した種子を野方図に使い続けることは避けるべきであろう。害虫抵抗性作物を利用する際には、誰もが HDR 規定を徹底すべきである。この事例から得られる教訓は、適切な規制により科学技術の使用が持続可能になるということであろう。現在、抵抗性害虫の発生を抑制するために、HDR 規定の実施に加えて、複数の Bt タンパク質を発現する品種が導入されている (Siegfried and Hellmich, 2012)。

4.3 Bt toxin タンパク質効用範囲外の害虫が大発生した

害虫が抵抗性を獲得する問題のほかに、Bt タンパク質が殺虫効果を持たない目 (もく) の害虫が大発生して問題になっている。中国では 1997 年から Bt ワタが商業栽培されているが、抵抗性害虫 (オオタバコガ cotton bollworm : *Helicoverpa armigera* など) 被害のほかに、カスミカメムシ科の害虫 (mirid bug) の大発生が問題になっている (Lu et al., 2010)。mirid bug は、もともと時折発生する程度で被害が比較的軽い害虫であった。しかし、Bt ワタ導入後の 2002 年頃から大発生を繰り返している。Lu らは、この大発生の原因が Bt ワタ導入により殺虫剤の散布が減少したためであると結論づけている。こ

のように、Bt 作物が導入されることで鱗翅目の害虫が減少し、そのかわりに Bt タンパク質の殺虫効果が及ばない目の害虫が台頭することは Bt 作物が導入される以前から予想されていた。これに対し白井 (2007) が予想外であったとしているのは、Bt トウモロコシの圃場で同じ鱗翅目である Western Bean Cutworm (*Striacosta albicosta*) が台頭したことである (Cantangui and Berg, 2006)。Western Bean Cutworm によるトウモロコシの被害は 1990 年代にはほとんど見られなかった。しかし、2000 年代に入ってから Western Bean Cutworm によるトウモロコシの食害が目立つようになった。この原因は当時広く栽培されていた Bt トウモロコシは Bt タンパク質のうち Cry1Ab タンパク質を発現する品種だったが、Western Bean Cutworm には Cry1Ab タンパク質の効果が薄いことがあげられる。

これらの事例から得られる教訓は、何よりも生態系という複雑系を制御することの難しさであろう。現代科学が発達したとはいえ、生態系や生体内における複雑なメカニズムは全容が解明されたとは言いがたい。そのため、想定外の事態を招くことは今後もあり得ると考えられる。しかしながら、このことから遺伝子組み換え技術を制御不能であると結論づけることは、いささかナイーブであると筆者には思われる。抗生物質の歴史は耐性菌との戦いであり、殺虫剤の歴史は耐性害虫との戦いである。上記のような事例は、遺伝子組み換え技術を利用していなくても起こったであろう。予測不可能性は、遺伝子組み換え技術のみにまつわる問題ではない。フランソワ・ジャコブは『ハエ、マウス、ヒト』(1997) の中で、

予見不可能性は、科学的探求の性質そのものに属している。(原章二訳)

と述べている。不測の事態を注意深く監視し続け、代替策を講じることでしか科学技術の発展を維持することはできないのではないだろうか。Western Bean Cutworm には Cry1Ab タンパク質とは別の Bt タンパク質である Cry1F タンパク

質が有効であることが明らかになり、現在流通しているトウモロコシ品種には Cry1Ab と Cry1F の両方を発現するものが多い (Siegfried and Hellmich, 2012)。

5 3つ目のキーワード『科学では決定できないこと』

ここまで、遺伝子組み換え技術の有用性とその持続可能性を脅かす要因について述べてきた。ここで、筆者が断りなく仮定していたことがある。それは、遺伝子組み換え技術を利用し続けることが「善いこと」である、ということだ。技術の持続可能性を考えると、その技術が「善いもの」であるということが前提となる。食品としての安全性に問題がなく、資源の投入を抑制しつつも高収量を実現できることから、筆者は遺伝子組み換え技術を用いることは「善いこと」であると考えている。しかし、この意見は一面的であると言わざるを得ない。Buckingham と Phillips (2001) は、遺伝子組み換え技術にまつわる疑問を大きく2つに分類している。その2つとは、「それは安全なものか?」と「それは善いものか?」である。これら2つの問題は、それぞれ2つずつの問題を抱えている。「安全なものか?」に関する問題点とは、①食品安全性、②環境安全性であり、「善いものか?」についての問題点とは、③平等および社会的懸念、④倫理的懸念である。それぞれの項目について詳細は述べないが、①、②について扱う学問分野は自然科学と数学であり、③、④について扱う学問分野は社会科学や人文科学であるとしている。筆者の専門は植物細胞生理学であり、遺伝子組み換え技術について考えるときには自然科学からのアプローチに偏りがちである。筆者は①、②については問題ないと判断しているが、③、④については筆者の持つ自然科学の知識からでは判断することはできない。というのは、自然科学には「善悪を判断すること」はできないからである (Rutherford and Ahlgren, 1989)。これは、単に生態系や生体のもつメカニズムに関する科学

<特集論文1>

的知見が不足しているからではない。例えば、「人間が他の生物の遺伝子を改変することは許されることか?」といった疑問には、どれほど科学的知見を積み上げても答えを出すことができない。人間は古代から植物の優良な形質を選抜して栽培品種とし、農業を営んできたが、遺伝子組み換え技術がこれらの育種と本質的に異なるかどうかは自然科学では判断できないだろう。そのため、遺伝子組み換え技術を継続的に利用することが「善いこと」であるかは、様々な専門性を持つ人が集まる学際的な議論が必要になる。

6 結言

近年、科学技術が高度に発達するにつれそれぞれの分野における専門性が高まり、日常生活は専門家に依存することで維持されることを余儀なくされている（ギデンズ，1990）。一方で、日本においては東日本大震災後に科学者や専門家に対する信頼が大きく損なわれたという調査結果がある（文部科学省，2012a）。また、科学技術は制御可能であると考えた国民が半減し、科学技術の発展に対して不安を持つヒトが増加したと報告されている。この原因として、科学技術の持つリスクや不確実性について十分な情報が公開されなかったことが指摘されている。筆者を含めた専門家は、襟を正さなければならない状況である。フランソワ・ジャコブは前掲書（1997）で、

なによりもまず科学者は、市民に向かって話し、市民に理解してもらわなければならない。と述べ、

真実をいうだけでは不十分なのだ。真実は、そのすべてをいわれる必要がある。何も秘密にしてはならない。科学者の責任はそこに懸かっている。科学者はなにもかも、自分が心配する応用技術や脅威に思うこと一切を、闇に残してはならない。（原章二訳）

としている。今後、科学技術が安心して利用され続けるためには、十分な情報公開と、市民と専門家との間での『開かれた討論』がますます重要に

なるだろう。

しかしながら、どれほど情報が公開されたとしても市民が関心を持たなくては議論を成熟させることはできない。東日本大震災に伴う原子力発電所の事故に際して筆者が痛感したことは、筆者自身が原子力発電について知識も関心も持ってこなかったという事実であった。日常生活が科学技術に依存しており、このことが必然的にある程度の危険を伴うものであることを、筆者を含めた市民がそれぞれの立場で『自覚』し、科学技術利用を専門家任せにせず、議論に参加することが必要であろう。

単に議論に参加するだけでは、理解を深めることはできない。科学技術の高度化に伴って重要になってくるのは『理科教育』である。筆者は都内で、おもに公立中学校に通う生徒に対する初等理科教育に15年以上携わってきた。近年、痛感するのは生徒たちの理科離れ、常識的な理科知識の欠如である。実際、2011年に行われた国際調査では小学4年生の理科学力は持ち直し傾向にあるものの、中学2年生の理科学力は低迷している（文部科学省，2012b）。理科学力の低迷は日本の生産業に対するダメージもさることながら、科学技術について市民一人ひとりが自ら考える能力が損なわれていることを示しており、民主主義の危機というべきであろう。

本稿では食糧問題の解決のために遺伝子組み換え技術を持続的に利用する方策を考察し、それを科学技術一般に普遍化することをこころみた。遺伝子組み換え技術に関する議論は多岐にわたる。これらの議論のうち、筆者は自然科学の知識を用いた解析が可能なものについて考察した。その際、重要なことは『多様な技術の利用』と『健全な科学』であり、このことは、科学技術一般の持続可能性を議論する際にも重要であった。一方で、科学技術を利用する是非については、自然科学の知見だけでは判断できない。『科学では決定できないこと』については、様々な専門性を持ち寄り、学際的な議論が必要になる。しかし、科学技術に関する議論をすべて専門家任せにすることは適当では

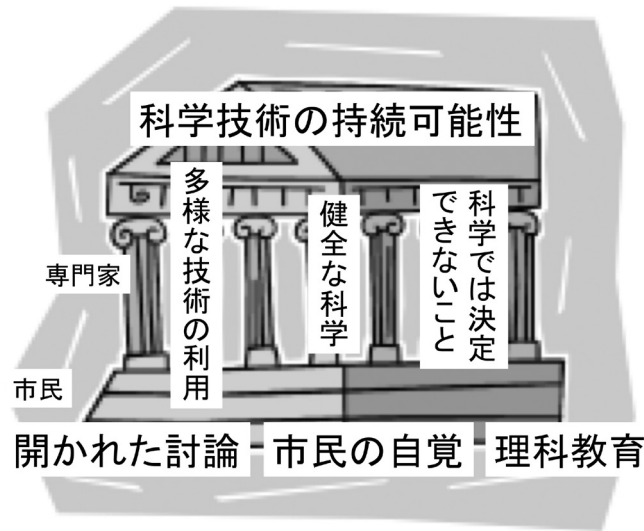


図2 科学技術の利用は専門家レベルにおける『多様な技術の利用』『健全な科学』『科学では決定できないこと』という柱の上で持続可能になるが、これらの柱はすべて専門家を含めた市民レベルでの『開かれた討論』『市民の自覚』『理科教育』を土台としている。

ない。今後、ますます高度化する科学技術に生活が依存する上で、市民が議論に参加することが欠かせなくなる。市民と専門家が十分に公開された情報をもとにした『開かれた討論』の場に参加すること、専門家を含めた市民が科学技術に依存しているという『自覚』を持つこと、議論に必要な知識が『理科教育』というかたちでもたらされることが、科学技術の持続可能性にとって重要であると結論づけ、本稿を終えることにする（図2）。

謝辞

本稿を執筆するにあたり、法政大学生命科学部・長田敏行教授に多くの貴重なアドバイスをいただきました。法政大学生命科学部・山下雄一氏には図の作成にご協力いただきました。また、農業環境技術研究所・白井洋一氏および奥語靖洋氏、市民バイオテクノロジー情報室・天笠啓祐氏、FOOD COMMUNICATION COMPASS・森田満樹氏にも、有益な情報をいただきました。シンジェンタジャパン・神座サイトではGM作物試験圃場を見学させていただきました。上記の他にも、多数の方々に資料を提供していただいたり、助言をいただいたりしました。厚く御礼申

上げます。

引用文献

- 天笠啓祐, 2000, 『遺伝子組み換え食品』, 緑風出版.
 安斎育郎, 2011, 『福島原発事故 どうする日本の原発政策』, かもがわ出版.
 朝日新聞経済部, 1983, 『食糧 何が起きているか』朝日新聞社.
 Bagla, P., 2010, "Hardy Cotton-Munching Pests Are Latest Blow to GM Crops," *Science* 327: 1439.
 Basu, S. K., M. Dutta, A. Goyal, P. K. Bhowmik, J. Kumar, S. Nandy, S. M. Scagliusi, R. Prasad, 2010, "Is genetically modified crop the answer for the next green revolution?," *GM crops*, 1: 68-79.
 Bravo, A., M. Soberon, 2008, "How to cope with insect resistance to Bt toxins?," *Trends Biotech*, 26: 573-579.
 Buckingham, D. E., P. W. B. Phillips, 2001, "Hot Potato, Hot Potato: Regulating Products of Biotechnology by the International Community," *J World Trade*, 35: 1-32.
 Cantangui, M. A., R. K. Berg, 2006, "Western Bean Cutworm, *Striacosta albicosta* (Smith)

<特集論文1>

- (Lepidoptera: Noctuidae), as a Potential Pest of Transgenic Cry1Ab *Bacillus thuringiensis* Corn Hybrids in South Dakota,” *Environ Entomol*, 35: 1439-1452.
- Cong, L., C. Wang, L. Chen, H. Liu, G. Yang, G. He, 2009, “Expression of phytoene synthase1 and carotene desaturase crtI genes result in an increase in the total carotenoids content in transgenic elite wheat (*Triticum aestivum* L.),” *J Agric Food Chem*, 57: 8652-8660
- ジュリアン・クリブ, 2010, 『90億人の食糧問題 世界的飢饉を回避するために』シーエムシー出版.
- Datta, S. K., 2007, “Impact of Plant Biotechnology in Agriculture,” T. Nagata, H. Lorz, J. M. Widholm ed., *Transgenic Crops IV in Biotechnology in Agriculture and Forestry 59*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 3-31.
- Duke, S. O., S. B. Powles, 2008, “Glyphosate: a once-in-a-century herbicide,” *Pest Manag Sci*, 64: 319-325.
- Enserink, M., 2008, “Tough Lessons from Golden Rice,” *Science*, 320: 468-471
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2004, 『世界食料農業白書(2004 - 05年版) 2003 - 04年報告』国際農林業協働協会 (JAICAF) .
- FAO, 2011, 『世界の食糧不安の現状 2011年報告』国際農林業協働協会 (JAICAF) .
- アンソニー・ギデンズ, 1990, 『近代とはいかなる時代か? モダニティの帰結』而立書房.
- Hanson, M. R., 1991, “Plant mitochondrial mutations and male sterility,” *Annu Rev Genet*, 25: 461-486.
- レオン・ヘッサー, 2009, 『“緑の革命”を起こした不屈の農学者 ノーマン・ボーローグ』悠書館.
- Hutchison, W. D., E. C. Burkness, P. D. Mitchell, R. D. Moon, T. W. Leslie, S. J. Fleischer, M. Abrahamson, K. L. Hamilton, K. L. Steffey, M. E. Gray, R. L. Hellmich, L. V. Kaster, T. E. Hunt, R. J. Wright, K. Pecinovsky, T. L. Rabaey, B. R. Flood, E. S. Raun 2010, “Areawide Suppression of European Corn Borer with Bt Maize Reaps Savings to Non-Bt Maize Growers,” *Science*, 330: 222-225.
- International Life Sciences Institute (国際生命科学研究所バイオテクノロジー研究部会), 2010, 『遺伝子組み換え食品を理解する II』, 国際生命科学研究所.
- James, C., 2012, “Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2012”, International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications.
- 小出裕章, 2011, 『原発のウソ』, 扶桑社
- フランソワ・ジャコブ, 1997, 『ハエ、マウス、ヒト』みすず書房.
- 国際イネ研究所, 2012, 「When will Golden Rice be available to farmers and consumers?」, 国際イネ研究所ホームページ, (2012年12月31日参照, http://www.irri.org/index.php?option=com_k2&view=item&id=12108&Itemid=100533&lang=en) .
- トーマス・クーン, 1962, 『科学革命の構造』みすず書房.
- Levings, C. S. III, J. N. Siedow, 1992, “Molecular basis of disease susceptibility in the Texas cytoplasm of maize,” *Plant Mol Biol*, 19: 135-147.
- Lu, Y., K. Wu, Y. Jiang, B. Xia, P. Li, H. Feng, K. A. G. Wyckhuys, Y. Guo, 2010, “Mirid Bug Outbreaks in Multiple Crops Correlated with Wide-Scale Adoption of Bt Cotton in China,” *Science*, 328: 1151-1154.
- Lu, Y., K. Wu, Y. Jiang, Y. Guo, N. Desneux, 2012, “Widespread adoption of Bt cotton and insecticide decrease promotes biocontrol services,” *Nature*, 487: 362-365.
- 文部科学省, 2012a, 『平成24年度版 科学技術白書』, 日経印刷
- 文部科学省, 2012b, 「国際数学・理科教育動向調査 (TIMSS2011) のポイント」, 文部科学省ホームページ, (2012年12月31日参照, http://www.mext.go.jp/component/a_menu/education/detail/_icsFiles/afieldfile/2012/12/13/1230782_01.pdf) .
- ジャック・モノー, 1971, 『偶然と必然』みすず書房.
- Naqvia, N., C. Zhua, G. Farrea, K. Ramessara, L. Bassiea, J. Breitenbachb, D. P. Conesac, G. Rosc, G. Sandmannb, T. Capella, P. Christoua, 2009, “Transgenic multivitamin corn through biofortification of endosperm with three vitamins representing three distinct metabolic pathways,” *PNAS*, 106: 7762-7767.
- National Research Council, 2010, *The Impact of Genetically Engineered Crops on Farm Sustainability in the United States*, Washington DC: The National Academies Press.

- 大澤勝次 江面浩, 2005, 『図集 植物バイオテックの基礎知識』農文協.
- パー・ピンストラップ・アンダーセン エビー・シオラー, 2000, 『遺伝子組換え作物 世界の飢餓とGM作物をめぐる論争』学会出版センター.
- Pitzschke, A., H. Hirt, 2010, "New insights into an old story: *Agrobacterium*-induced tumor formation in plants by plant transformation," *EMBO J*, 29: 1021-1032.
- カール・R・ポパー, 1959, 『科学的発見の論理』恒星社厚生閣.
- Potrykus, I., 2012, "Unjustified regulation prevents use of GMO technology for public good," *Trends Biotech*, 31: 131-133.
- Powles, S. B., 2008, "Evolved glyphosate-resistant weeds around the world: lessons to be learnt," *Pest Manag Sci*. 64: 360-365.
- Qaim, M., D. Zilberman, 2003, "Yield Effects of Genetically Modified Crops in Developing Countries," *Science* 299: 900-902.
- Rutherford, F. J., A. Ahlgren, 1989, *Science for All Americans*, New York: Oxford University Press.
- Shaner, D. L., R. B. Lindenmeyerb, M. H. Ostlieb, 2011 "What have the mechanisms of resistance to glyphosate taught us?," *Pest Manag Sci*. 68: 3-9.
- 清水隆 長田敏行, 2008, 「オーキシン受容体と信号の流れ」『生物の科学 遺伝』62: 41-44.
- 白井洋一, 2007, 「GMO情報：北米のBtトウモロコシ、農耕地生態系への想定外の影響」, 農業と環境 農業環境技術研究所ホームページ, (2012年12月31日参照, <http://www.niaes.affrc.go.jp/magazine/091/mgzn09107.html>).
- 白井洋一, 2012, 「害虫抵抗性遺伝子組換え作物による環境・生態系への影響：2010年までの研究事例」『農業環境技術研究所報告』30: 1-38.
- ヴァンダナ・シヴァ, 1991, 『緑の革命とその暴力』日本経済評論社.
- Sigfried, B. D., R. L. Hellmich, 2012, "Understanding successful resistance management," *GM Crops Food*, 3: 184-193.
- Tabashnik, B. E., A. J Gassmann, D. W. Crowder, Y. Carrière, 2008, "Insect resistance to *Bt* crops: evidence versus theory," *Nat Biotech*, 26: 199-202.
- Tabashnik, B. E., F. Huang, M. N. Ghimire, B. R. Leonard, B. D. Siegfried, M. Rangasamy, Y. Yang, Y. Wu, L. J. Gahan, D. G. Heckel, A. Bravo, M. Soberón, 2011, "Efficacy of genetically modified Bt toxins against insects with different genetic mechanisms of resistance," *Nat Biotech*, 29: 1128-1131.
- 垂水雄二, 2010, 『生命倫理と環境倫理 生物学からのアプローチ』八坂書房.
- 東洋経済, 2011, 「原発事故について、政府や東京電力の情報公開は十分か? 東洋経済1000人意識調査」, 東洋経済オンライン, (2012年12月31日参照, <http://toyokeizai.net/articles/-/7121>).
- Tuteja, N., S. Verma, R. K. Sahoo, S. Raveender, I. B. L. Reddy, 2012, "Recent advances in development of marker-free transgenic plants: Regulation and biosafety concern," *J Biosci*, 37: 167-197.
- マークス・ウォールセン, 2011, 『バイオバンク DIY 科学者たちのDNAハック!』NHK出版.
- 山口夕, 2003, 「遺伝子組換えのABC」, 佐野浩 監修, 『遺伝子組み換え植物の光と影II』学会出版センター, 23-33.
- Ye, X., S. Al-Babili, A. Klott, J. Zhang, P. Lucca, P. Beyer, I. Potrykus, 2000, "Engineering the Provitamin A (β -Carotene) Biosynthetic Pathway into (Carotenoid-Free) Rice Endosperm," *Science*, 287: 303-305.
- Zambryski, P., H. Joos, C. Genetello, J. Leemans, M. Van Montagu, J. Schell, 1983, "Ti plasmid vector for the introduction of DNA into plant cells without alteration of their normal regeneration capacity," *EMBO J*, 2: 2143-2150.

清水 隆 (シミズ・タカシ)

法政大学サステイナビリティ研究教育機構リサーチ・アドミニストレータ