

総説

害虫抵抗性農作物の育種と総合的害虫管理 における利用

— 遺伝子組換え害虫抵抗性農作物の開発 —

藤家 梓

キーワード：害虫抵抗性農作物、育種、総合的害虫管理 (IPM)、遺伝子組換え、環境保全型農業

はじめに

環境保全型農業 (Sustainable Agriculture) とは、農業の持つ物質循環機能を生かし、生産性との調和等に留意しつつ、土作り等を通じて、化学肥料、農薬の使用等による環境負荷の軽減に配慮した持続的な農業のことをいう (1994年4月農林水産省「環境保全型農業推進の基本的な考え方」より)。環境保全型農業においては、環境負荷の低減をめざして化学肥料とともに化学農薬の使用量を減らすという試みが広く行われている。そのため、化学農薬を中心とした化学的防除法に代わる生物的・物理的・耕種的防除法の開発が行われている。また、環境負荷の小さい化学農薬の開発も行われている。

わが国では、農林水産省が環境保全型農業対策室を設け、環境保全型農業の全国展開を推進している。千葉県では、「ちばエコ農業推進事業」を2002年4月から開始し、農薬や化学肥料の使用量を県が定める標準的な使用量の半以下に抑えた「ちばエコ農産物」の出荷が2002年11月1日から行われている。エコ農業では、エコ農業産地の指定とエコ農産物の認証を行っている。千葉県農業総合研究センターでも、1993年(当時 千葉県農業試験場)から今日まで「環境保全型農林技術開発研究事業」に取り組み、多くの技術開発を行ってきた(1999年4月千葉県農業試験場「環境にやさしい稲作・野菜・果樹新技術の開発と実証」; 2003年3月千葉県農業総合研究センター「環境保全型農業新技術—ちばエコ農業の推進に向けて—」)。

総合的害虫管理 (Integrated Pest Management, 以下IPMとする) は、今日では害虫防除の基本理念として広く認知され、環境保全型農業における防除の基本的な考え方となっている。さらに、IPMの理念は農作物に対する有害生物 (病害虫・雑草等) 防除全般にも適用され、総合的有害生物管理としても認知されつつある。IPM

の考え方は、害虫の殺虫剤抵抗性問題を契機に1960年代に海外で生まれ、その後理論は発展した。IPMには三つの基本概念 (中筋, 1997) が存在する。その内の一つに「複数の防除法の合理的統合」があるが、害虫防除関係者の関心は生物的防除法や物理的防除法に向かい、害虫抵抗性品種の利用 (耕種的防除法) に関しては、営々と技術開発が行われてきた割には注目度は低かった。

しかし、病虫害抵抗性を付与した農作物の利用は、最も基盤的な害虫防除技術である (浅賀, 1994)。害虫を対象にしたIPMにおいても、害虫抵抗性農作物の利用は大いに推進されなければならないが、その開発は従来の育種法では容易ではなく、遺伝子組換えが極めて魅力的な手法と考えられる (藤家, 2003ab)。

そこで、本稿では害虫抵抗性農作物の育種と総合的害虫管理における利用について、技術発展のめざましい遺伝子組換え、特にアメリカ合衆国における遺伝子組換え農作物 (以下GM農作物とする) の開発を中心に概説する。なお、害虫名については最初の記述では和名と学名あるいは学名と英名を併記し、二度目以降の記述では和名あるいは学名のみを記した。

本文に入るに先立ち、有益なご教示をいただいた岡山大学農学部の中筋房夫教授と千葉大学園芸学部の三位正洋教授に厚くお礼を申し上げる。また、アメリカオレゴン州立大学のMarcos Kogan博士からは貴重な文献をご恵与いただいた。

I IPMと害虫抵抗性農作物の役割

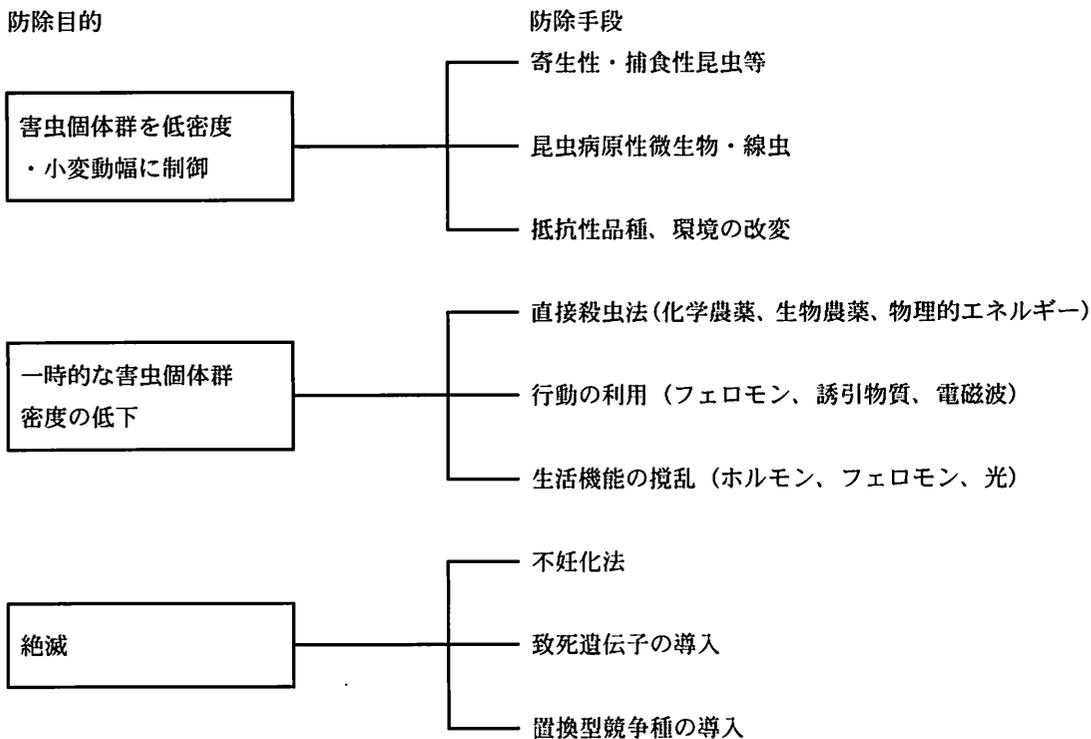
IPMは、1965年にFAO (国連食糧農業機関) によって「あらゆる適切な技術を相互に矛盾しない形で使用し、経済的被害を生じるレベル以下に害虫個体群を減少させ、かつその低いレベルに維持するための害虫個体群管理システム」と定義された。当初、わが国ではIPMは総合防除 (Integrated Pest Control, 巖・桐谷, 1973) と呼ばれていたが、その後理論的にも洗練され、IPMとして防除現場に広く浸透し、害虫防除の考え方に大きな影響を与えてきた。

一方、防除現場ではIPMが十分機能していないという指摘が幾度となくされてきた(例えば、藤家、1985; 小山、1985; 久野、1988; 中筋、1988; 鈴木、2000; 那波、2001)。また、IPMとは「複数の防除法の合理的統合」による防除法と誤解され、IPMの持っている他の二つの概念「経済的被害許容水準(Economic Injury Level、以下EILとする)」と「害虫個体群管理システム」が抜け落ちていることも多い。藤家(1999、2001)は、IPMの三つの基本概念の重要性を支持するとともに、農耕地以上にゴルフ場の芝草害虫管理にはIPM導入のための条

件が整っていることを指摘した。

IPMをさらに進めた総合的生物多様性管理(Integrated Biodiversity Management、以下IBMとする)という考え方も提唱されている(桐谷、1998; Kiritani、2000)。IBMとは、IPMと種の保全・保護を両立させて、水田等の農耕地で生産性を保ちながら生物多様性を維持しようという考え方であるが、この考え方もゴルフ場の害虫管理に導入できる画期的な考え方である(藤家、1999、2001)。

IPMにおける害虫防除の目的は、第1図に示したよう



第1図 総合的害虫管理(IPM)における防除目的と各種の防除手段(桐谷ら、1971)

に、①害虫個体群を低密度・小変動幅に制御、②一時的な害虫個体群密度の低下、③絶滅に分けられる(桐谷ら、1971)。かつての害虫防除では、化学農薬による「一時的な害虫個体群密度の低下」が主目的であり、その傾向は今も続いている。一方、環境保全型農業への関心が高まる中で、化学農薬の多用に対する反省から、「害虫個体群を低密度・小変動幅に制御」をめざした技術開発が注目を浴びている。具体的には、寄生性・捕食性昆虫等の利用や昆虫病原性微生物・線虫の利用のような天敵利用と害虫抵抗性品種の利用、および環境の改変である。害虫防除研究者・技術者の関心は天敵利用に向いているというきらいはあるが、害虫抵抗性品種の利用はIPMにおける極めて重要な防除手段である(藤家、2003a)。

害虫抵抗性は、害虫の摂食や産卵が農作物の形態的・

生化学的特性によって抑制され、加害自体が起こりにくい非選好性(Non-preference)、加害自体は行われるが、害虫の発育・生存・繁殖が農作物の形態的・生化学的特性によって抑制される抗生作用(Antibiosis)、加害自体は普通に行われ、害虫の摂食・産卵・発育・生存・繁殖等も抑制されることはないが、農作物の被害が軽い耐性(Tolerance)の三種類に分類される(Paintner、1951)。耐性は補償性ともいわれ、高密度の害虫を支える能力を有しているため、好ましくないと考えられている。しかし、害虫を支えるということはその天敵を支えるということでもあり、IPMにおいては利用価値がある。農作物の害虫抵抗性を明確にするには、詳細な被害解析(藤家、1997)を必要とする。しかし、害虫の加害様式や農作物の被害発現は極めて複雑であり、現状では各農作物にお

ける被害解析は十分ではない。

Kogan (1994) は、生態学的観点から見た害虫抵抗性農作物の好ましい点を次のとおり示した。①害虫に対する作用の特異性 (specificity)、②害虫に経代的に作用する蓄積的な効果 (cumulative effectiveness)、③防除効果の持続性 (persistence)、④環境との調和性 (harmony with the environment)、⑤適用の容易さ (ease of adoption)、⑥他の防除方法との両立性 (compatibility)。一方、害虫抵抗性農作物の問題点として次の点を示した。①長い開発期間 (time of development)、②開発における遺伝子的な制限 (genetic limitations)、③バイオタイプ出現の可能性 (biotypes)、④矛盾する害虫抵抗性形質 (conflicting resistance traits)。

IPMでは、害虫密度がEILに達すると予測された場合、防除が可能な時点で害虫防除手段を講ずるが、その時の害虫密度を「要防除密度(control threshold)」という。Kennedyら(1987)は、要防除密度と三つのタイプの害虫抵抗性品種との関係を明らかにした。非選好性品種は害虫の初期密度を減少させるため、害虫密度は要防除密度に到達しにくい。抗生作用品種は害虫の増加率を低下させるため、害虫密度の要防除密度への到達は遅れる。耐性品種は害虫の増加率には影響しないが、要防除密度そのものが高いため、害虫密度の要防除密度への到達は遅れる。IPMでは、害虫抵抗性品種と他の防除手段とを組み合わせることにより、農作物の被害をEIL以下にすることをめざすため、三つのタイプの害虫抵抗性品種のそれぞれに利用価値がある。

害虫抵抗性品種の利用は、IPMにおいて極めて重要であるが、交配中心の従来育種手法では多くの害虫に抵抗性を持った品種の育成は容易ではない。しかし、技術開発の進展の著しい遺伝子組換え等DNAレベルでの技術により単一害虫に対する抵抗性品種のみならず、複合的な抵抗性品種の開発も加速されることが期待される。

II 遺伝子組換えによる害虫抵抗性農作物の開発

害虫抵抗性遺伝子としては、植物由来と微生物由来のものがある。サトウキビにおけるスノードロップレクチン(Sétamouら、2002)、アズキにおける α -アミラーゼインヒビター(IshimotoとKitamura、1993)の利用等が植物由来の例として挙げられるが、その他の事例ではほとんどすべて天敵細菌*Bacillus thuringiensis*由来の殺虫タンパク産生遺伝子(以下*Bt*遺伝子という)が利用されている。

*B. thuringiensis*は1901年にわが国でカイコの卒倒病の病原菌として発見されて以来、世界各地で分離されている。菌株は製剤化され、海外では1965年から、わが国では1982年からBT剤と呼ばれる殺虫剤として利用されている。BT剤が殺虫剤として社会的に認知されるまでには紆余曲折があった。また、BT剤は紫外線による不活化や風雨による流亡等殺虫剤が一般的に持っている弱点を抱えている。したがって、農作物への*Bt*遺伝子の導入はこれらの弱点を回避する手段として期待されている。

海外ではすでに商品化されている*Bt*遺伝子を導入したGM農作物(以下*Bt*農作物という)は、トウモロコシ(以下*Bt*トウモロコシという)、ジャガイモ(以下*Bt*ジャガイモという)、ワタ(以下*Bt*ワタという)で、これらはすべてアメリカ合衆国で開発された。海外でのGM農作物利用は、着々と増加している(2003年8月3日 読賣新聞)。わが国でも、ニカメイガ*Chiro suppressalis*やコブノメイガ*Cnaphalocrocis medinalis*を抑制する*B. thuringiensis*のCry1Abを発現する水稻(Fujimotoら、1993)、オオタバコガ*Helioverpa armigera*の加害を抑制するCry1Abを発現すキク(Shinoyamaら、2002)等が開発されているが、その数は少なく、商品化もされていない。

そこで、害虫抵抗性農作物に関する応用的な論文が数多く掲載されているアメリカ昆虫学会誌Journal of Economic Entomologyより、トウモロコシ、ジャガイモ、ワタ等を対象に*Bt*遺伝子を用いたGM農作物の研究開発状況を紹介します。掲載された*Bt*遺伝子を用いたGM農作物に関連した報告は第1表に示したとおりで、報告の始まった1991年から2002年までを対象とした。また、第

第1表 アメリカ合衆国昆虫学会誌Journal of Economic Entomology(1991-2002)に掲載された*Bt*遺伝子を用いた害虫抵抗性GM農作物に関連した報告

農作物と対象害虫 (和名または英名)	報告者 (年次)
トウモロコシ	
<i>Agrotis ipsilon</i> (タマナヤガ)	Pilcherら (1997)
<i>Diabrotica undecimpunctata howardi</i> (southern corn rootworm)	Hermanら (2002)
<i>Diabrotica virgifera virgifera</i> (western corn rootworm)	Hermanら (2002)

<i>Diatraea grandiosella</i> (southwestern corn borer)	Barryら (2000)
<i>Eriborus terebrans</i>	OrrとLandis (1997)
<i>Helicoverpa zea</i> (corn earworm, bollworm)	Pilcherら (1997)、Storerら (2001)
<i>Macrocentrus grandii</i>	OrrとLandis (1997)
<i>Ostrinia nubilalis</i> (ヨーロッパアワノメイガ)	Barryら(2000)、Bauteら(2002)、CatanguiとBerg(2002)、Dowd (2000)、Huangら (2002)、PilcherとRice(2001)、OrrとLandis (1997)
<i>Papaipema nebris</i> (stalk borer)	BinningとRice(2002)、Pilcherら (1997)
<i>Plodia interpunctella</i> (ノシメマダラメイガ)	Sedlacekら (2001)
<i>Pseudaletia unipuncta</i> (armyworm)	Pilcherら (1997)
<i>Sitotroga cerealella</i> (バクガ)	Sedlacekら (2001)
<hr/>	
ジャガイモ	
<i>Folsomia candida</i> (collembolan)	Yu (1997)
<i>Myzus persicae</i> (モモアカアブラムシ)	Shiehら (1994)
<i>Oppia nitens</i> (oribatid mite)	Yu (1997)
<i>Ostrinia nubilalis</i> (ヨーロッパアワノメイガ)	Eboraら (1994)
<i>Phthorimaea operculella</i> (ジャガイモガ)	Eboraら (1994)、Mohammedら (2000)
<hr/>	
ワタ	
<i>Bemisia tabaci</i> (タバココナジラミ)	Wilsonら (1992)
<i>Bucculatrix thurberiella</i> (cotton leafperforator)	Wilsonら (1992)
<i>Estigmene acrea</i> (saltmarsh catapillar)	Adamczykら (2001)、Wilsonら (1992)
<i>Folsomia candida</i> (collembolan)	Yu (1997)
<i>Helicoverpa armigera</i> (オオタバコガ)	OlsenとDaly (2000)
<i>Helicoverpa zea</i> (corn earworm, bollworm)	Benedictら (1996)、HardeeとBryan (1997)、Stewartら (2001)
<i>Heliothis virescens</i> (tabacco budworm)	Adamczykら (2001)、Benedictら (1996)、HardeeとBryan (1997)、Greenplate (1999)、Jenkinsら (1993)、SimsとBerberich (1996)
<i>Lygus lineolaris</i> (tarnished plant bug)	HardeeとBryan (1997)
<i>Oppia nitens</i> (oribatid mite)	Yu (1997)
<i>Pectinophora gossypiella</i> (ワタアカミムシ)	Carrièreら (2001)、Wilsonら (1992)
<i>Pseudoplusia includens</i> (soybean looper)	Adamczykら (2001)
<i>Spodoptera exigua</i> (シロイチモジヨトウ)	Adamczykら (2001)、HardeeとBryan (1997)、Stewartら (2001)、Wilsonら (1992)
<i>Spodoptera frugiperda</i> (fall armyworm)	Adamczykら (2001)、HardeeとBryan (1997)、Stewartら (2001)
<i>Trichoplusia ni</i> (cabbage looper)	Benedictら (1996)、HardeeとBryan (1997)
共通	Umbeckら (1991)
<hr/>	
その他 (イネ、タバコ、エンドウ)	
<i>Chiro suppressalis</i> (ニカメイガ)	Aliniaら (2000)
<i>Scirpophaga incertulas</i> (サンカメイガ)	Aliniaら (2000)
<i>Helicoverpa zea</i> (corn earworm, bollworm)	Hoffmannら (1992)
<i>Naranga aenescens</i> (フタオビコヤガ)	Aliniaら (2000)
<i>Sitona lineatus</i> (pea leaf weevil)	QuinnとBezdicsek (1996)

注1) OrrとLandis (1997) における*Eriborus terebrans* と*Macrocentrus grandii*は、ヨーロッパアワノメイガの寄生性天敵。

2) Yu (1997) における*Folsomia candida*と*Oppia nitens*は、*Bt*たんばくによる防除対象外節足動物。

2表に利用されている*Bt*遺伝子由来の殺虫たんぱくを示した。

第2表 *Bt*遺伝子を用いた害虫抵抗性GM農作物において利用されている殺虫たんぱく

農作物	殺虫たんぱく
トウモロコシ	Cry1Ab, Cry1Ac, Cry9C, Cry34Ab1, Cry35Ab1
ジャガイモ	Cry1Ac, Cry3A, Cry5
ワタ	Cry1Ab, Cry1Ac, Cry2Ab
その他 (イネ, タバコ, エンドウ)	Cry1Ab, Cry3A

注) Journal of Economic Entomology (1991-2002) より

1. トウモロコシ

*Bt*トウモロコシにおける報告では、重要害虫ヨーロッパアワノメイガ*Ostrinia nubilalis*をはじめとして、10種類のチョウ目(鱗翅目)害虫が対象とされていた。殺虫たんぱくとしては、Cry1Abを中心に5種類が利用されていた。

(1) アワノメイガに対する防除試験

アメリカ合衆国の最も重要な農作物の一つである飼料用トウモロコシは、ヨーロッパから侵入したと推定されるヨーロッパアワノメイガにより重大な被害を受けている。幼虫は茎(稈)や子実部(雌穂)等に食入するため防除が極めて困難であることが、*Bt*トウモロコシ導入の素地となっていると考えられる。

ヨーロッパアワノメイガを対象とした防除試験では、Barryら(2000)、CatanguiとBerg(2002)、Huangら(2002)によって*Bt*トウモロコシの防除効果が示された。ただし、防除効果は*Bt*トウモロコシの系統によって異なった(Huangら、2002)。Bauteら(2002)は*Bt*トウモロコシの被害や収量を調査し、その経済的な有効性を明らかにした。PilcherとRice(2001)は、*Bt*トウモロコシへの圃場における産卵数は非*Bt*トウモロコシと比べて減少しないが、ふ化幼虫の食入孔は減少し、ふ化幼虫に対する防除効果が高いことを示した。また、OrrとLandis(1997)も*Bt*トウモロコシへの産卵数は影響されないことを明らかにした。ヨーロッパアワノメイガ等の害虫による食害痕が*Aspergillus*属菌や*Fusarium*属菌の侵入を助長する恐れがあるが、*Bt*トウモロコシでは食害が抑制されるだけでなく、穂への糸状菌感染も減少した(Dowd、2000)。

(2) その他の害虫に対する防除試験

ヨーロッパアワノメイガ以外の害虫に対する*Bt*トウモ

ロコシの防除効果試験は、タマナヤガ*Agrotis ipsilon*、*Helicoverpa zea* (corn earworm、bollworm)、*Papaipema nebris* (stalk borer)、および*Pseudaletia unipuncta* (armyworm)がPilcherら(1997)によって、*Diatraea grandiosella* (southwestern corn borer)がBarryら(2000)によって、さらに*P. nebris* (stalk borer)がBinningとRice(2002)によって、それぞれ行われている。報告では、タマナヤガを除いては防除効果が認められた。Sedlacekら(2001)は、*Bt*トウモロコシの貯穀害虫ノシメマダラメイガ*Plodia interpunctella*とバクガ*Sitotroga cerealella*への影響を調査し、貯穀害虫密度を効果的に減少させる可能性を示した。

(3) 害虫の発育や生存への影響

Storerら(2001)は*H. zea*を対象に、Pilcherら(1997)はタマナヤガ、*P. nebris*、*P. unipuncta*、および*H. zea*を対象に、Hermanら(2002)は*Diabrotica undecimpunctata howardi* (southern corn rootworm)と*Diabrotica virgifera virgifera* (western corn rootworm)を対象にそれぞれの害虫の発育や生存への*Bt*トウモロコシの影響を調べた。その結果、何れの害虫でも発育の遅延や生存率の低下が認められた。

2. ジャガイモ

*Bt*ジャガイモにおける報告は、チョウ目2種とカメムシ目(半翅目)1種と少なかった。殺虫たんぱくとしては、Cry1Ac他2種類が利用されていた。

(1) 害虫の摂食量への影響と防除試験

Eboraら(1994)は、ジャガイモの主要害虫であるジャガイモガ*Phthorimaea operculella*とトウモロコシの主要害虫でジャガイモも加害するヨーロッパアワノメイガの生存と摂食量への影響を調査した。ジャガイモガでは1齢幼虫に殺虫効果が見られ、摂食量は減少した。一方、ヨーロッパアワノメイガでは幼虫への殺虫効果は見られたが、摂食量は減少しなかった。また、*Bt*ジャガイモの塊茎は収穫直後でも1年近く貯蔵後でもともにジャガイモガの1齢幼虫に高い殺虫効果を示した(Mohammedら、2000)。

(2) ウイルス伝搬への影響

Shiehら(1994)は、*Bt*ジャガイモにおいてもモモアカアブラムシ*Myzus persicae*の摂食行動は影響されないことを明らかにした。さらに、モモアカアブラムシによるウイルス伝搬も影響されないことを示唆した。

3. ワタ

ワタ害虫の種類は極めて多く、これまで多くの殺虫剤が散布されてきたため殺虫剤抵抗性の発達も著しく、ワ

タ栽培では害虫問題が深刻である。したがって、ワタ害虫に対する関心は高く、*Bt*ワタを対象としてワタアカミムシ *Pectinophora gossypiella* やタバコガ類等のチョウ目を中心に12種類の害虫が報告されていた。殺虫たんぱくとしては、*Cry1Ab*他2種類が利用されていた。

(1) 主要害虫に対する防除試験

Wilsonら(1992)は、*Bt*ワタのワタアカミムシ等への抵抗性を調査し、ワタの種子被害率が減少することを報告した。Carrièreら(2001)は、ワタアカミムシに対する*Bt*ワタの防除効果を示すとともに、アリゾナ州のワタ栽培において1995年に*Bt*ワタを導入した後、5年間で殺虫剤の使用回数が1/3になったことを報告した。

また、*H. zea*や*Heliothis virescens*(*tabaco budworm*)に対する圃場試験(Benedictら、1996)や*H. virescens*に対する室内試験(Jenkinsら、1993)でも、*Bt*ワタの高い防除効果が報告されている。OlsenとDaly(2000)は、*Cry1Ac*殺虫タンパクのオオタバコガへの毒性がワタの葉に混ぜられると低下することを明らかにした。その原因としてワタ葉に含まれるタンニンの影響を示唆した。

(2) その他の害虫に対する防除試験

その他の害虫として、*H. virescens*(Adamczykら、2001、Greenplate、1999、HardeeとBryan、1997)、*H. zea*(HardeeとBryan、1997、Stewartら、2001)、*Lygus lineolaris*(*tarnished plant bug*)(HardeeとBryan、1997)、シロイチモジヨトウ *Spodoptera exigua*、*Spodoptera frugiperda*(*fall armyworm*)(HardeeとBryan、1997; Stewartら、2001)、および *Trichoplusia ni*(*cabbage looper*)(Benedictら、1996; HardeeとBryan、1997)をそれぞれ対象にした報告がある。さらに、Wilsonら(1992)は、タバココナジラミ *Bemisia tabaci*、*Bucculatrix thurberiella*(*cotton leafperforator*)、*Estigmene acrea*(*saltmarsh catapillar*)、シロイチモジヨトウを対象に、Adamczykら(2001)は、*E. acrea*、シロイチモジヨトウ、*S. frugiperda*、*Pseudoplusia includens*(*soybean looper*)を対象にそれぞれ調査を行った。これらのほとんどで*Bt*ワタの防除効果は高かったが、カメムシ目の *L. lineolaris* では効果は明確でなかった。

(3) 殺虫タンパクの残留性と発現部位

SimsとBerberich(1996)は、*Bt*ワタの加工の過程で殺虫タンパクの97%以上が除かれることを明らかにした。また、殺虫タンパク量は生育シーズンの経過とともに低下したが、末端葉での活性は比較的高かった(Greenplate、1999)。

4. その他の農作物

トウモロコシ、ジャガイモ、ワタ以外の農作物として、

Aliniaら(2000)は、ニカメイガ、サンカメイガ *Scirpophaga incertulas*、コブノメイガ、およびフタオビコヤガ *Naranga aenescens* に対する*Bt*イネ(香り米)の抵抗性が栄養成長期に強いことを報告した。その他、*Bt*遺伝子あるいはササゲのトリプシンインヒビターを導入した遺伝子組換えタバコの *H. zea* への影響(Hoffmannら、1992)、エンドウと *Sitona lineatus*(*pea leaf weevil*)の相互関係への根粒の*Bt*殺虫タンパク生産の影響(QuinnとBezdicsek、1996)に関する報告がある。

III 遺伝子組換えの問題点と環境への影響

GM農作物の安全性問題は、日野(2000)によって詳細に解説されている。安全性が注目されているのは、食品としての安全性と環境への影響である。食品としての安全性の確認は、「食品、添加物等の規格基準」(厚生労働省)によって、環境への影響の確認は「農林水産分野における組換え体利用のための指針」(農林水産省)によって、それぞれ行われている。さらに、GM農作物の開発は「組換えDNA実験指針」(文部科学省)にしたがって行われている(2004年2月指針廃止、法制化)。

しかし、わが国では店頭で「遺伝子組換え」食品を見ることがほとんどなく、GM農作物が認知されているとはいえない状況にある。科学的な根拠に基づき安全であることの証明だけでなく、心情的な安心感の確保も必要である。日野(2000)が主張しているように、従来から行われているPA(Public Acceptance、社会的認知)に向けた努力だけでなく、新たなPA(Public Awareness、社会的意識)の構築に向けた取り組みも必要である。

一方、誰も食品は安全であって欲しいと願っているが、完全に安全な食品は存在しない(日野、2000)。食品の安全性のみならず、世の中のあるゆる事象に絶対的な安全(リスクゼロ)というものが存在しないことが、話を複雑にしているともいえる。

食品としての安全性を検証するための概念である「実質的同等性(substantial equivalence)」が社会的に認知されることが重要である。また、健康機能性を付与したGM農作物の開発は、一般的に漫然と感じているリスク感をベネフィット感が上回る可能性があり、GM農作物受け入れの糸口になるかも知れない。食品の場合、実質的同等性の概念に基づいた安全性の検証は可能であり、さらに表示を明確に行うことにより、食べるかどうかの判断を各自が行うことができるため、問題は比較的単純である。しかし、次に述べる環境は基本的に人々に共有されるため、問題は複雑である。

Daleら(2002)は、環境に対するGM農作物の負の影響

の可能性について報告した。害虫抵抗性関係では、①害虫抵抗性の非標的生物への影響、②土壤中の殺虫毒素の動態と集積、③Bt毒素に対する害虫の抵抗性の発達が挙げられている。わが国では、一般圃場でのGM農作物の栽培に対し、生態系の攪乱を防ぐため、すなわち環境への影響への配慮から法規制が検討されようとしている(2003年2月2日、19日 日本農業新聞)。GM農作物の環境への影響については、食品としての安全性以上に証明が難しく、さらに人々に共有されるという点で大きな議論を呼ぶであろう。一般的に環境問題を考える場合、判断の論拠として客観的なリスク評価が不可欠である(中西、2002)。GM農作物の野外試験における環境への影響評価には「ファミリーリティ(Famillarity)」という概念が、広く用いられている。しかし、遺伝子組換えによって作出された環境浄化植物、ストレス耐性植物、および本来雑草性を持つ組換え植物等の評価には馴染まない(鎌田、2001)。したがって、例えば雑草化の可能性のある芝草への遺伝子組換え研究(伊東ら、1995；Asanoら、1997)等では、研究と平行して環境への影響評価法を検討する必要がある。

雑誌の性質上、Journal of Economic Entomology誌(1991-2002)ではBt農作物の防除効果試験等害虫と関わりのある報告が中心で、環境への影響に関する報告は少なかった。Btワタ花粉の分散は10mほどの距離で減少するという報告(Umbeckら、1991)、Btトウモロコシに寄生するヨーロッパアワノメイガ幼虫への天敵*Eriborus terebrans*と*Macrocentrus grandii*の寄生は非Btトウモロコシと変わらないという報告(OrrとLandis、1997)、および防除対象外の節足動物*Folsomia candida*(collembolan)と*Oppia nitens*(oribatid mite)への影響はなかったという報告(Yu、1997)があった程度である。

Bt農作物の環境への影響については、松井(2000、2003)によって解説されているが、この問題が一気に世界的に注目されるようになったのは、Btトウモロコシの花粉を摂食させたオオカバマダラ*Danaus plexippus*の幼虫が44%死亡したというNature誌の記事(Loseyら、1999)によってである。Bt遺伝子によって産生される殺虫タンパクの多くは、チョウ目幼虫に特異的に殺虫性を示すことから、積極的に幼虫に与えれば当然死亡すると考えられるが、オオカバマダラは開帳が10cm近くある大型の美しいチョウで、人気が高かったこともあって、反響は大きかった。しかし、アメリカ合衆国環境保護庁は、野外において栽培されているBtトウモロコシの花粉の飛散によるオオカバマダラ個体群へのリスクは無視できる程度小さいと評価したとのことである(松井、2003)。

わが国では、オオカバマダラ問題を契機に農林水産省

(現 独立行政法人) 農業環境技術研究所において、Btトウモロコシが非標的のチョウ目昆虫に及ぼす影響評価試験が行われた(松尾ら、2002)。圃場からの花粉飛散量、チョウ目昆虫への影響、花粉中のBtトキシン含有量、絶滅危惧種への影響が調査され、その調査結果に基づき、「農林水産分野における組換え体利用のための指針」にBtトウモロコシの環境影響評価項目が追加された。

また、白井(2003)は害虫抵抗性遺伝子組換え農作物が非標的昆虫に及ぼす影響に関する研究事例を詳細に報告した。報告では、オオカバマダラ問題、天敵への影響、訪花昆虫への影響、土壤生物相への影響、標的害虫への対策等が取り上げられている。*B. thuringiensis*由来の殺虫たんぱく質の環境への影響に関する知見は集積されつつあるが、レクチンや酵素インヒビターのような植物由来の殺虫成分についての知見は十分ではなく、これらを産生するGM農作物ではより慎重な事前調査が必要である(白井、2003)。

Bt農作物を含めたGM農作物の環境影響評価を行う場合、非GM農作物の環境影響評価のデータが不可欠であるが、このような生態学的な研究の蓄積は極めて少ない。最近研究が下火であるが、特に害虫を含めた昆虫の個体群生態学的研究の推進が望まれる。

IV 分子農業における遺伝子組換えの利用

GM農作物の食品としての安全性と環境への影響が注目されるという状況の中で、新たな対応も検討する必要があると考えられる。その一つとして、「分子農業」(Molecular Farming)における活用がある。

分子農業については島田(2003)によって概説されているが、農作物を含めた植物を物質生産のためのバイオリアクター(生体触媒機能のある酵素を利用して物質生産する手段)として活用する農業システムをいう。遺伝子組換えを用いることにより、植物に新たな有用形質を導入し、従来にない物質生産機能を持った植物を作出することができる。したがって、分子農業のキーテクノロジーとして、遺伝子組換えが位置づけられる。分子農業はすでに国際的にも認知され、2002年9月にはOECD(経済協力開発機構)の国際ワークショップも開催されている。また、アメリカ合衆国ではすでに分子農業の実用化に向けた取り組みが行われている(1998年2月号 日経サイエンス)。

食糧生産をめざさない分子農業では、植物を物質生産のためのバイオリアクターとみなす点で従来の分子育種とは発想が異なる。さらに、分子農業では植物を耕地で栽培して収穫するため、従来の微生物や動物細胞を利用

したバイオリクターが必要とする高価な培地や無菌環境をまったく必要としない。植物による物質生産の具体例は、第3表に示したとおりである。抗体(ウイルス性肝炎、蛇毒等)や工業原料(アミノ酸、ビタミン、アルカロイド、乳酸、エタノール、油脂等)等の生産が期待される。例えば、ペプチドの一種であるタナチンは昆虫のカメム

シ類によって生産される抗菌物質であり、人間にも抗菌物質として利用できる。大量生産が難しいため実用化されていないが、水稲での生産の可能性が示されている。

分子農業のシステムは大気中のCO₂を利用する循環系で、生成物も生分解性が高く、環境中への残留性が低い(島田, 2003)。したがって、環境保全の観点からみて

第3表 植物による物質生産の例

産生物質	目的	植物
植物ウイルス抗体	耐病性の付与	タバコ
カビのキチナーゼに対する抗体	耐病性の付与	タバコ
ヒルジン (タンパク質分解酵素阻害物質)	医薬品製造	ナタネ
病原性大腸菌に対する抗体	経口免疫	ジャガイモ
病原性大腸菌の表面抗原	経口免疫	ジャガイモ
虫歯菌に対する抗体	医薬品製造	タバコ
B型肝炎ウイルス抗体	医薬品製造	イネ
B型肝炎ウイルス表面抗原	経口免疫	ジャガイモ
ガン細胞表面抗原に対する抗体	医薬品製造	コムギ、エンドウ
クモの糸	工業原料 (繊維)	タバコ、ジャガイモ
β-ヒドロキシ酪酸	工業原料(生分解性プラスチック)	タバコ、ジャガイモ

(島田, 2003より)

もその推進は望ましい。環境保全型農業における防除の基本的な考え方である総合的害虫管理においても、殺虫物質の分子農業による生産は、その理念にかなった望ましい方法である。これまで、除虫菊のピレトリン、タバコのニコチン、デリス属植物のロテノン等が殺虫物質として利用されてきたが、分子農業においてこれらの物質を含む各種殺虫物質の安定的な生産が期待される。

分子農業を行う場合、従来からの農作物産地に導入することには問題がある。その理由としては、第一に農耕地は一義的には食用作物の栽培に用いられるべきである。第二に分子農業で用いる植物の栽培は、栽培環境が十分でない土地でも生育旺盛なGM植物を利用することにより、農耕地として適さないような土地でも可能となる。第三に分子農業には、新たな環境問題を引き起こすのではないかと懸念がある。以上の点から、従来からの農作物産地への導入には慎重であるべきである。

したがって、環境問題等への配慮のためにも、従来からの農作物産地ではなく、比較的隔離された土地での簡易施設等での栽培を考えるべきであろう。また、特定の土地で恒久的に分子農業を行うのではなく、遊休地の一時的な利用でもよい。多くの解決を要する問題を抱えて

いるにも関わらず、農作物による物質生産という分子農業は、将来農業の概念を一変させる可能性を秘めている。

おわりに

害虫抵抗性農作物の利用は、環境保全型農業における防除の基本的な考え方となっているIPMの中で重要な役割を担っている。IPMの中で位置づけられてこそ有効な防除手段として真価を発揮すると考えられるが、従来の育種手法では害虫抵抗性農作物の開発は容易ではない。その点、遺伝子組換えの利用は極めて魅力的であるが、わが国の技術開発は大きく遅れを取っており、技術開発を進展させる必要がある。また、GM農作物に対しては食品としての安全性と環境への影響という二点で懸念がもたれている。よく「安全」と「安心」は違うといわれるが、開発者側はまず安全を証明し、その前提に立って安心を訴えるということを地道に行う必要がある。ただし、育種が遺伝子組換えに特化する必然性はなく、交配育種・突然変異育種・細胞育種・DNAマーカー育種等様々な手法の中から、育種目的に合わせて手法を選ぶ必要がある。

今後とも大きな問題になるであろう環境への影響に関

しては、生物工学や育種関係の研究者・技術者だけで対応するのではなく、生態学の研究者の関与を積極的に求めるべきである。なお、遺伝子組換えは食糧生産を目指した農業とはまったく異質の分子農業において、技術として花開く可能性がある。

引用文献

- Adamczyk, J. J., Jr., L. C. Adams, and D. D. Hardee (2001) Field efficacy and seasonal expression profiles for terminal leaves of single and double *Bacillus thuringiensis* toxin cotten genotypes. *J. Econ. Entomol.* 94:1589-1593.
- Alinia, F., B. Ghareyazie, L. Rubia, J. Bennett, and M. B. Cohen (2000) Effect of plant age, larval age, and fertilizer treatment on resistance of a *cryIAb*-transformed aromatic rice to lepidopterous stem borers and foliage feeders. *J. Econ. Entomol.* 93:484-493.
- 浅賀宏一 (1994) 環境保全と農業. 農業および園芸 69:79-83.
- Asano, Y., Y. Ito, M. Fukami, M. Ugaki, and A. Fujiie (1997) Production of herbicides resistant transgenic creeping bent plants. *International Turfgrass Research Journal.* 8:261-267.
- Barry, B. D., L. L. Darrah, D. L. Huckla, A. Q. Antonio, G. S. Smith, and M. H. O'day (2000) Performance of transgenic corn hybrids in Missouri for insect control and yield. *J. Econ. Entomol.* 93:993-999.
- Baute, T. S., M. K. Sears, and A. W. Schaafsma (2002) Use of transgenic *Bacillus thuringiensis* Berliner corn hybrids to determine the direct economic impact of the European corn borer (Lepidoptera: Crambidae) on field corn in eastern Canada. *J. Econ. Entomol.* 95:57-64.
- Benedict, J. H., E. S. Sachs, D. W. Altman, W. R. Deaton, R. J. Kohel, D. R. Ring, and S. A. Berberich (1996) Field performance of cottons expressing transgenic CryIA insecticidal proteins for resistance to *Heliothis virescens* and *Helicoverpa zea* (Lepidoptera: Noctuidae). *J. Econ. Entomol.* 89:230-238.
- Binning, R. R. and M. E. Rice (2002) Effects of transgenic Bt corn on growth and development of the stalk borer *Papaipema nebris* (Lepidoptera: Noctuidae). *J. Econ. Entomol.* 95:622-627.
- Carrière, Y., T. J. Dennehy, B. Pedersen, S. Haller, C. Eilers-Kirk, L. Antilla, Y.-B. Liu, E. Willott, and B. E. Tabashnik (2001) Large-scale management of insect resistance to transgenic cotton in Arizona: Can transgenic insecticidal crops be sustained? *J. Econ. Entomol.* 94:315-325.
- Catangui, M. A. and R. K. Berg (2002) Comparison of *Bacillus thuringiensis* corn hybrids and insecticide-treated isolines exposed to bivoltine European corn borer (Lepidoptera: Crambidae) in South Dakota. *J. Econ. Entomol.* 95:155-166.
- Dale, P. J., B. Clarke, and E. M. G. Fontes (2002) Potential for the environmental impact of transgenic crops. *Nature Biotechnology* 20:567-574.
- Dowd, P. F. (2000) Indirect reduction of ear molds and associated mycotoxins in *Bacillus thuringiensis* corn under controlled and open field conditions: utility and limitation. *J. Econ. Entomol.* 93:1669-1679.
- Ebora, R. V., M. M. Ebora, and M. B. Sticklen (1994) Transgenic potato expressing the *Bacillus thuringiensis* CryIA(c) gene effects on the survival and food consumption of *Phthorimea operculella* (Lepidoptera: Gelechiidae) and *Ostrinia nubilalis* (Lepidoptera: Noctuidae). *J. Econ. Entomol.* 87:1122-1127.
- 藤家 梓 (1985) 害虫防除と生態学－個体群生態学の過去と未来－. 植物防疫 39:449-454.
- 藤家 梓 (1997) 害虫による作物の被害. 害虫防除 (中筋房夫・大林延夫・藤家 梓 著). 初版. 71-84頁. 朝倉書店. 東京.
- 藤家 梓 (1999) 環境保全を目指した芝草管理技術の開発－ゴルフ場における総合的生物多様性管理－. 植物防疫 53:359-363.
- 藤家 梓 (2001) ゴルフ場における総合的害虫管理 (IPM)－IPMと生物多様性保全の両立を目指して－. 芝草研究 30:35-43.
- 藤家 梓 (2003ab) 害虫抵抗性農作物の育種と総合的害虫管理に基づいた環境保全型農業における利用－遺伝子組換え農作物を中心として－〔1〕,〔2〕. 農業および園芸 78:453-552, 553-557.
- Fujimoto, H., K. Itoh, M. Yamamoto, J. Kyojuka, and K. Shimamoto (1993) Insect resistant rice generated by introduction of a modified δ -

- endotoxin gene of *Bacillus thuringiensis*. *Biol Technology* 11:1151-1155.
- Greenplate, J. T. (1999) Quantification of *Bacillus thuringiensis* insect control protein Cry1Ac over time in bollgard cotton fruit and terminals. *J. Econ. Entomol.* 92:1377-1383.
- Hardee, D. D. and W. W. Bryan (1997) Influence of *Bacillus thuringiensis*-transgenic and nectariless cotton on insect populations with emphasis on the tarnished plant bug (Heteroptera: Miridae). *J. Econ. Entomol.* 90:663-668.
- Herman, R. A., P. N. Scherer, D. L. Young, C.A. Mihaliak, T. Meade, A. T. Woodsworth, B. A. Stockhoff, and K. E. Narva (2002) Binary insecticidal crystal protein from *Bacillus thuringiensis* strain PS149B1: effects of individual protein components and mixtures in laboratory bioassays. *J. Econ. Entomol.* 95:635-639.
- 日野明寛 (2000) バイオテクノロジーを巡る現状と課題 - 遺伝子組換えの安全性確認, PAの取り組みについて -. *農業および園芸* 75:743-752.
- Hoffmann, M. P., F. G. Zalon, L. T. Wilson, J. M. Smilanick, L. D. Malyj, J. Kiser, V. A. Hilder, and W. M. Barnes (1992) Field evaluation of transgenic tobacco containing genes encoding *Bacillus thuringiensis* δ -endotoxin or cowpea trypsin inhibitor: efficacy against *Helicoverpa zea* (Lepidoptera: Noctuidae). *J. Econ. Entomol.* 85:2516-2522.
- Huang, F., L. L. Buschman, R. A. Higgins, and H. Li (2002) Survival of Kansas dipel-resistant European corn borer (Lepidoptera: Crambidae) on Bt and non-Bt corn hybrids. *J. Econ. Entomol.* 95:614-621.
- Ishimoto, M. and K. Kitamura (1993) Specific inhibitory activity and inheritance of an α -amylase inhibitor in a wild common bean accession resistant to the Mexican bean weevil. *Japan. J. Breed.* 43:69-73.
- 伊東靖之・深見正信・浅野義人・杉浦清之・宇垣正志・藤家 梓 (1995) エレクトロポレーションによる形質転換クレーピングベントグラスの育成. *芝草研究* 23:128-133.
- 巖 俊一・桐谷圭治 (1973) 総合防除の理論. 総合防除 (深谷昌次・桐谷圭治 編著). 初版. 39-96頁. 講談社. 東京.
- Jenkins, J. N., W. L. Parrott, J. C. McCarty, JR., F. E. Callahan, S. A. Berberich, and W. R. Deaton (1993) Growth and survival of *Heliothis virescens* (Lepidoptera: Noctuidae) on transgenic cotton containing a truncated form of the delta endotoxin gene from *Bacillus thuringiensis*. *J. Econ. Entomol.* 86:181-185.
- 鎌田 博 (2001) 遺伝子組換え植物の安全性研究の現状と展望. *研究ジャーナル* 24(4):5-12.
- Kennedy, G. G., F. Gould, O. M. B. DePonti, and R. E. Stinner (1987) Ecological, agricultural, genetic, and commercial considerations in the deployment of insect-resistant germplasm. *Environ. Entomol.* 16:327-338.
- 桐谷圭治 (1998) 総合的有害生物管理 (IPM) から総合的生物多様性管理 (IBM) へ. *研究ジャーナル*, 21(12):33-37.
- Kiritani, K (2000) Integrated biodiversity management in paddy field: shift of paradigm from IPM toward IBM. *Integrated Pest Management Reviews* 5:175-183.
- 桐谷圭治・笹波隆文・中筋房夫 (1971) 害虫の総合防除生態学的方法. *防虫科学* 36:78-98.
- Kogan, M. (1994) Plant resistance in pest management. In "Introduction to insect pest management (R. L. Metcalf and W. H. Luckmann eds.). 3rd ed. 73-128, Jone Wiley & Sons, Inc. New York.
- 小山重郎 (1985) 害虫防除と生態学 - 総合防除の定着を旨として -. *植物防疫* 39:455-460.
- 久野英二 (1988) 害虫管理の展望. *植物防疫* 42:509-510.
- Losey, J. E., L. S. Raynor, and M. E. Carter (1999) Transgenic pollen harms monarch larvae. *Nature* 399:214.
- 松井正春 (2000) B t 遺伝子組換え作物の環境影響とその評価. *植物防疫* 54:252-255.
- 松井正春 (2003) 害虫抵抗性遺伝子組換え作物の生態影響評価. *農業技術* 58:49-53.
- 松尾和人・川島茂人・杜 明遠・齋藤 修・松井正春・大津和久・大黒俊哉・松村 雄・三田村 強 (2002) B t トウモロコシの非標的鱗翅目昆虫に及ぼす影響評価. *農環研報* 21:41-73.
- Mohammed, A., D. S. Douches, W. Pett, E. Grafius, J. Coombs, Liswidowati, W. Li, and M. A. Madkour (2000) Evaluation of potato tuber

- moth (Lepidoptera: Gelechiidae) resistance in tubers of *Bt-cry5* transgenic potato lines. J. Econ. Entomol. 93:472-476.
- 那波邦彦 (2001) 農作物の生産現場における病害虫防除技術－IPMの理念と現実そして展望－. 農薬誌 26:399-407
- 中西準子 (2002) リスク解析がめざすもの. 科学 72:982-989.
- 中筋房夫 (1988) 害虫管理－理論と実際. 植物防疫 42:511-516.
- 中筋房夫 (1997) 総合的害虫管理. 総合的害虫管理学. 初版. 45-58頁. 養賢堂. 東京.
- Olsen, K. M and J. C. Daly (2000) Plant-toxin interactions in transgenic Bt cotton and their effect on mortality of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae). J. Econ. Entomol. 93:1293-1299.
- Orr, D. B. and D. A. Landis (1997) Oviposition of European corn borer (Lepidoptera: Pyralidae) and impact of natural enemy populations in transgenic versus isogenic corn. J. Econ. Entomol. 90:905-909.
- Painter, R. H. (1951) Insect resistance in crop plants. MacMillan, New York, 520p. (第2次増訂改版 農学大事典 (野口弥吉・川田信一郎 監修. 1987). 1087-1088頁. 養賢堂. 東京より間接引用)
- Pilcher, C. D. and M. E. Rice (2001) Effect of planting dates and *Bacillus thuringiensis* corn on the population dynamics of European corn borer (Lepidoptera: Crambidae). J. Econ. Entomol. 94: 730-742.
- Pilcher, C. D., M. E. Rice, J. J. Obrycki, and L. C. Lewis (1997) Field and laboratory evaluations of transgenic *Bacillus thuringiensis* corn on secondary lepidopteran pests (Lepidoptera:Noctuidae). J. Econ. Entomol. 90:669-678.
- Quinn, M. A. and D. F. Bezdicsek (1996) Effect of Cry IIIA protein production in nodules on pea-pea leaf weevil (Coleoptera: Curculionidae) interactions. J. Econ. Entomol. 89:550-557.
- Sedlacek, J. D., S. R. Komaravalli, A. M. Hanley, B. D. Price, and P.M. Davis (2001) Life history attributes of Indian meal moth (Lepidoptera: Pyralidae) and angoumois grain moth (Lepidoptera: Gelechiidae) reared on transgenic corn kernels. J. Econ. Entomol. 94:586-5929.
- Sétamou, M., J. S. Bernal, J. C. Legaspi, T.E. Mirkov, and B. C. Legaspi, Jr. (2002) Evaluation of lectin-expressing transgenic sugarcane against stalkborers (Lepidoptera: Pyralidae): effect on life history parameters. J. Econ. Entomol. 95:469-477.
- Shieh, J.-N., R. E. Berry, G. L. Reed, and P.A. Rossignol (1994) Feeding activity of green peach aphid (Homoptera: Aphididae) on transgenic potato expressing a *Bacillus thuringiensis* ssp. *tenebrionis* δ -endotoxin gene. J. Econ. Entomol. 87:618-622.
- 島田浩章 (2003) 組換え体植物を利用した物質生産－分子農業：食糧生産を目的としない新しい農業システム－. 農業技術 58:193-198.
- Shinoyama, H., M. Komano, Y. Nomura, and T. Nagai (2002) Introduction of delta-endotoxin gene of *Bacillus thuringiensis* to chrysanthemum [*Dendranthema* × *grandiflorum* (Ramat.) Kitamura] for insect resistance. Breeding Science. 52:43-50.
- 白井洋一 (2003) 害虫抵抗性遺伝子組換え作物が非標的昆虫に及ぼす影響：現在までの研究事例. 応動昆 47: 1-11.
- Sims, S. R. and S. A. Berberich (1996) *Bacillus thuringiensis* CryIA protein levels in raw and processed seed of transgenic cotton: determination using insect bioassay and ELISA. J. Econ. Entomol. 89:247-251.
- Stewart, S. D., J. J. Adamczyk, Jr., K. S. Knighten, and F. M. Davis (2001) Impact of Bt cottons expressing one or two insecticidal proteins of *Bacillus thuringiensis* Berliner on growth and survival of Noctuid (Lepidoptera) larvae. J. Econ. Entomol. 94:752-760.
- Storer, N. P., J. W. Van Duyn, and G. G. Kennedy (2001) Life history traits of *Helioverpa zea* (Lepidoptera: Noctuidae) on non-Bt and Bt transgenic corn hybrids in eastern North Carolina. J. Econ. Entomol. 94:1268-1279.
- 鈴木芳人 (2000) I P M理念の抜本的見直し. 植物防疫 54:217-221.
- Umbeck, P. F., K. A. Barton, E. V. Nordheim, J. C. McCarty, W. L. Parrott, and J. N. Jenkins (1991) Degree of pollen dispersal by insects from a field test of genetically engineered cotton. J. Econ. Entomol. 84:1943-1950.

- Wilson, F. D., H. M. Flint, W. R. Deaton, D.A. J.Econ. Entomol. 85:1516-1521.
Fischhoff, F. J. Perlak, T. A. Armstrong, R. Yu, L., R. E. Berry, and B. A. Croft (1997) Effects of
L.Fuchs, S. A. Berberich, N. J. Parks, and B. R. *Bacillus thuringiensis* Toxins in transgenic cotton
Stapp (1992) Resistance of cotton lines containing and potato on *Folsomia candida* (Collembola:
a *Bacillus thuringiensis* toxin to pink bollworm Isotomidae) and *Oppia nitens* (Acari:Orbatidae).
(Lepidoptera: Gelechiidae) and other insects. J. Econ. Entomol. 90:113-118.

Breeding of Pest Resistance Crops
and its Utilization in Integrated Pest Management
—Development of Genetically Modified
Pest Resistance Crops—

Azusa FUJIE

Key words: pest resistance crops, breeding,
integrated pest management (IPM),
genetically modify,
sustainable agriculture