

Bt 遺伝子組換え作物の環境影響とその評価

農林水産省農業環境技術研究所 ^{まつ}松 ^い井 ^{まさ}正 ^{はる}春

はじめに

最近、アメリカを中心に Bt トキシン遺伝子や除草剤耐性遺伝子等を導入した作物の栽培面積が急増している。将来にわたって人類が遺伝子組換え作物の開発と普及による「果実」を手にするためには、遺伝子組換え食品の適切な表示による消費者の選択の自由を確保するとともに、食品の安全性と環境への安全性について科学的裏付けに基づいた議論を行い、安全性への社会的受容（パブリックアクセプタンス：PA）を進める必要がある。

1999年5月、イギリスの科学雑誌 Nature に、オオカバマダラ（マダラチョウ科）の幼虫に食草であるトウワタの葉に Bt トキシン（ δ -エンドトキシン）遺伝子組換えトウモロコシ（以下、Bt トウモロコシと略す）の花粉をふりかけて摂食させたところ、4日間で44%が死亡し、生き残った幼虫も体重が軽いことが報告された（LOSEY et al., 1999）。この論文は、遺伝子組換え作物の新しいタイプの環境影響を示すものとして世界中に波紋を投げかけた。その後、EU では遺伝子組換え作物・食品に対する審査を凍結する措置を発表した。我が国では、この問題に関して農林水産省が研究チームによる緊

急調査を行い、その結果を踏まえて2000年3月に栽培用の Bt トウモロコシについて新たな環境影響評価項目を設定した。本稿では、Bt トウモロコシを中心に、Bt 組換え作物（以下、Bt 作物と略す）の開発状況や環境影響評価についての最近の研究動向をまとめてみた。

I Bt 遺伝子組換え作物の現状

Bt トキシン遺伝子は、塩基配列を異にする多くの遺伝子型に分類されており、それぞれの遺伝子型に由来する Bt トキシンの殺虫活性を示す寄生昆虫の範囲が調べられている（飯塚, 1995）。アメリカ環境保護庁（EPA）に登録されている遺伝子組換え作物は、表-1 に示したように、トウモロコシでは主にヨーロッパアワノメイガ（*Ostrinia rubilalis*）を対象とする6系統、ワタでは主にワタアカミムシ（pink bollworm）やオオタバコガなどを対象とする1系統、ジャガイモではコロラドハムシを対象とする2系統などである（1999年7月現在）。我が国において、これまでに環境への安全性が確認された栽培目的の組換え作物は、Bt トウモロコシ1系統のみであるが実際にはまだ栽培されていない。また、国内で栽培目的ではない食品用あるいは飼料用の Bt 作物で環境への安全性が確認されているのは、トウ

表-1 アメリカ環境保護庁に登録されている Bt 組換え作物
(1999年5月現在)

作物名	会社名	Bt トキシン 遺伝子の種類	登録年月
ジャガイモ	モンサント・ネイチャーマーク	Cry 3 A	1995年5月
	モンサント・ネイチャーマーク	Cry 3 A	1998年12月
ワタ	モンサント	Cry 1 Ac	1995年10月
トウモロコシ	ノバルティス	Cry 1 Ab	1995年8月*
	マイコーゲン	Cry 1 Ab	1995年8月
	ノバルティス	Cry 1 Ab	1996年10月
	モンサント	Cry 1 Ab	1996年12月
	デカルブ	Cry 1 Ac	1997年3月
	アグレボ・PGS	Cry 9 C	1998年5月
ポップコーン	ノバルティス	Cry 1 Ab	1998年3月*
スイートコーン	ノバルティス	Cry 1 Ab	1998年3月

EPA ホームページの一部 (1999年5月27日現在)。

*同一系統であるが用途が異なる。

モロコシ5系統およびワタ3系統である(1999年6月現在)。

Bt作物全体の栽培状況は、世界全体(中国を除く)で1997年には410万haであったが、98年には800万haと急増し、このうちアメリカのBtトウモロコシの栽培面積は97年の280万haから98年には650万ha(全米トウモロコシ栽培面積の22%)と倍増した。このように栽培面積が急増したのは、Btトウモロコシの種子代が高いにもかかわらず、これを上回る反収の向上と殺虫剤散布コストの減少による収益増があるためで、生産者がBtトウモロコシを積極的に受け入れたことによる(横山, 1999)。

II Bt 遺伝子組換え作物の直接的および間接的な環境への影響

遺伝子組換え作物の環境へ及ぼす直接的なリスクとしては、組換え作物の雑草化、交雑による導入遺伝子の近縁野生植物種への拡散、導入遺伝子の生産する物質による非標的生物への影響などが考えられる。また、Bt作物の農業生態系への2次的影響として、広域栽培に伴って対象害虫にBt抵抗性が発達する可能性があり(RISSLER and MELLON, 1999)、アメリカではこのことを重大な問題として、種々の抵抗性発達抑制対策を実践している。Bt抵抗性害虫が出現するとBt作物のbreak downが起こるほかに、その地域において類似作物でオーガニック農法を営む生産者にとって必要なBt剤の効果が低下するという影響が考えられる。さらに、組換え作物が圃場で生き残り他の作物と競争したり、前作の組換え作物が後作の非組換え作物の収穫物に混じって表示上の問題を起す可能性がある。その他、組換え作物が今後開発途上国を含めて世界中に普及すると、各地域の在来栽培種が失われるなど生物多様性保全に関わる問題も生じる。これらの問題の発生を予測して、事前に技術的な対策を準備しておくことが重要である。なお、我が国では、Bt作物のトウモロコシやワタと交雑する野生植物種が存在せず、生のジャガイモは植物検疫上入れられないので遺伝子拡散は考えなくてもよい。また、雑草化については、組換え作物に該当する非組換え作物でこれまでに問題となった例はない。

1 Bt 遺伝子組換え作物に対する抵抗性害虫個体群出現の可能性とその対策

殺虫剤であるBt剤に対する抵抗性発達については、室内選抜試験により各種のチョウ目、甲虫目害虫で抵抗性の発達ないし感受性の低下が生じている(TABASHNIK, 1994)。また、圃場レベルでもBt剤抵抗性ないし感受

性低下個体群の発生例が、コナガ(森下・東, 1987; 田中・木村, 1991; 足立, 1992; SHELTON et al., 1993)、コロラドハムシ(ROUSH et al., 1990; TISLER and ZEHNDER, 1990)等で報告されている。コナガやノシメダラメイガのBt剤に対する抵抗性の遺伝様式は、不完全劣性の主動遺伝子に支配されている(McGAUGHEY and BEEMAN, 1988; HAMA et al., 1992)。しかし、最近、ヨーロッパアワノメイガのBt剤抵抗性は、不完全優性であるという報告(HUANG et al., 1999)が出され、このようなことがあるならば、Bt作物の栽培地域の一部に非組換え作物を栽培してBt抵抗性の発達を抑制するという現在の戦略にも影響する。また、Bt抵抗性のワタアカミムシの系統をBt組換えワタで飼育すると非抵抗性の系統を非組換えワタで飼育したよりも幼虫の発育期間が長くなるために、抵抗性個体同士が交尾する機会が増加する可能性が生じ(LIU et al., 1999)、このことが抵抗性発達に影響を及ぼすのかどうか議論となっている。以上のようなBt剤抵抗性害虫に関する知見を見ると、これまでにBt作物の栽培地域で抵抗性個体群が出現したという報告はまだないが、Bt作物の栽培面積の拡大や栽培年数の長期化に伴って、Btトキシシンに対する感受性が低下したり、抵抗性を有する害虫個体群が顕在する可能性は否定できない。

アメリカの環境保護庁および農務省は、Bt作物に対する抵抗性害虫の発生を回避するために、その登録時にIRM(Insect Resistance Management; 害虫抵抗性管理)を義務づけている。IRMでは、害虫のBt抵抗性が劣性遺伝すると見られることから、もし抵抗性個体が発生しても感受性個体と交尾することによって次世代が感受性となり、抵抗性個体群が顕在化しにくいように、非組換え作物を一定の割合で栽培する(保護区の設定)などの方法を主体に行っている。Btトウモロコシの場合は、これまで登録時にメーカーとの間で保護区の面積率について種々の設定がなされてきたが、EPAは2000年の作付けに当たっては最低20%、綿花栽培地帯ではオタバコガなどの共通害虫がいるために最低50%の保護区の設定を求めている。なお、保護区においては、その目的から害虫の発生程度が一定レベルを超えない限り、農薬の散布は認められていない。さらに、EPAは抵抗性の発達を早期に発見して対策を講じるために、圃場における抵抗性害虫のモニタリングを義務づけている。Bt作物における抵抗性害虫の発生抑制対策の基礎となる研究については、シミュレーション等に基づき保護区の配置の仕方や、成虫がBtトウモロコシの一部に産卵選好するような栽培を行い害虫の死亡率を高めるお

とり作物的な方法 (ALSTAD and ANDOW, 1995) 等の効果について論争が行われている。

2 Bt トウモロコシの生産する Bt トキシンによる環境影響

(1) Bt トウモロコシの花粉のチョウへの影響

LOSEY et al. (1999) の論文では、Bt トウモロコシの花粉を圃場内と同程度にトウワタの葉に振りかけて摂食させたと記述されているが、どの程度の花粉密度であるのか不明であり、我が国でも当初からこの実験室内での試験結果を直ちに野外のチョウなどへの影響に結びつけることの問題点が指摘された。しかし、この論文の社会的な反響は大きく、アメリカ国内はもとより我が国やヨーロッパでも Bt 花粉の環境影響についての調査が開始された。アメリカでは、1999 年 11 月初めにシンポジウムが開催され、野外では Bt 花粉のチョウへの影響はほとんど無視できる程度であるとの結論が出された。

(2) Bt トウモロコシの根から土壤中へ出る Bt トキシン

Bt トウモロコシから Bt トキシン (Cry IAb) が根圏に浸出し、土壤粒子にくっついて微生物による分解を受けにくくなり、長期間残留し活性を示すことが報告された (SAXENA et al., 1999)。この中で、Bt トキシンは根からの浸出の他、花粉の堆積や植物残さのすき込みによっても土壤中に蓄積され得るが、これがチョウ目の土壤害虫の制御に役立つのか、あるいは常時 Bt トキシンが土壤中にあるために害虫の抵抗性発達を助長するのか、非標的生物に影響があるのかなどについては不明であり、土中の残留は短期間という報告が一方にはあり今後研究が必要であるとされている。

(3) Bt トウモロコシの天敵への影響

HILBECK et al. (1998 a, b) は、Bt トウモロコシで飼育したヨーロッパアワノメイガを捕食性天敵であるヒメクサカゲロウ (*Crysopela carnea*) の幼虫に摂食させたところ、対照区よりも死亡率が高く、発育期間が長くなると報告した。さらに、Bt トキシン (Cry IAb) を液体人工飼料に入れて幼虫を飼育したところ、やはり、対照区よりも死亡率が高く、発育期間が長くなり、この Bt トキシンは 100 $\mu\text{mg/ml}$ (飼料液) で幼虫に毒性を示すとした。*Bacillus thuringiensis* の殺虫性結晶タンパク質が、寄主昆虫に毒性を示すのは、高 pH の中腸消化液で結晶が可溶化されてプロトキシンとなり、これが消化液中のタンパク質分解酵素で分解されて活性のあるトキシン (ペプチド) になり、消化管の受容体タンパク質と結合し、細胞膜に穴をあけるためである (飯塚, 1995)。チョウ目に活性を示す Bt トキシンがヒメクサ

カゲロウ幼虫に活性を示すメカニズムについては不明であり、今後検討する必要がある。

また、コナガの寄生蜂 (*Cotesia plutellae*) は、Bt 組換えナタネでも非組換えナタネでもコナガ幼虫に多く被害された葉を選好して飛来し、また、Bt 組換えナタネを摂食した Bt 抵抗性コナガの体内でもよく発育することが報告されている (SCHULER et al., 1999)。このように、Bt 作物圃場における作物、天敵類および害虫間の相互関係については、今後検討を加えるべきことが多い。

III 環境影響の事前評価の重要性

1 遺伝子組換え作物・食品の安全性評価の仕組み

遺伝子組換え作物の安全性評価の仕組みの概略としては、科学技術庁では実験段階における導入遺伝子の安全性を確認し、農林水産省では産業利用を想定して模擬的隔離条件等で環境への安全性を確認し、また、家畜飼料としての安全性の確認を行っている。厚生省では遺伝子組換え食品について安全性の確認を実施している。

2 環境影響評価の考え方

遺伝子組換え作物の安全性評価については、食品の安全性は実質的同等性 (導入タンパク質の安全性を確認し、それ以外の栄養成分やアレルゲンの含有量等が既存食品と同等であること)、環境への安全性はファミリー (導入する遺伝子および遺伝子導入された作物に関する科学的情報や過去の経験に精通していること) という考え方に基づいて行われている。遺伝子組換え作物は、将来にわたって、新しい性質を有するものが次々と開発されてくると予想される。したがって、環境影響評価の考え方や方法についても、科学的裏付けに基づいて、適宜新しい問題に柔軟に対応できるように評価方法を追加していく必要がある。

3 Bt トウモロコシにおける環境影響評価

Bt トウモロコシの花粉がオオカバマダラの幼虫に影響を及ぼすという報告の後、農林水産省では研究チームによる緊急調査を行い、花粉の飛散距離の調査と飛散モデルの作成、チョウ目昆虫への花粉摂食試験、花粉中の Bt トキシン含有量の測定を行うとともに、チョウ目昆虫の絶滅危惧種、危急種、希少種の分布、生態等に関する文献調査を行った。結論的には、まず、落下花粉数は、圃場から遠ざかるに従って急激に減少し、約 2 週間の開花期間中ずっと一定方向に好適な風が吹き続け、粘着物質を塗布したスライドガラス上に落下した花粉が全てそのまま蓄積するという意味での最大ポテンシャルを推定をした場合でも、2 週間の全落下花粉密度は圃場か

ら 10 m 離れたところで約 4,000 個/cm²であった (詳しくは農林水産技術会議ホームページ参照)。しかし、実際には、途中で風雨による葉上からの脱落や流亡、逆向きの風、腐敗など微生物による分解、太陽の紫外線による不活化があるはずなので、10 m 地点の葉上に実際に蓄積し、活性を示す花粉密度は上記の値よりもはるかに少なくなると推察される。したがって、チョウが影響を受ける可能性のある花粉密度が存在し得る圃場からの距離は、10 m よりもはるかに短い範囲であると結論されるが、具体的な数字の詰めは残されている。ところで、1999 年 11 月にアメリカで Bt トウモロコシとオオカバマダラの関係についてのシンポジウムが行われ、そこで三人の研究者から実際の葉上の落下花粉数が報告されている。すなわち、圃場内でのトウワタ葉上の花粉密度 (1 cm² 当たり) は 78 粒、圃場から 1 m 離れた地点で 28 粒、5 m 地点で 1.4 粒であり、花粉が影響しそうな距離は圃場から 1~2 m の範囲である。そして、葉上の花粉密度はグリセリンを塗布したスライドガラス上のそれよりもはるかに少なかった (SEARS, 1999 a)。また、圃場内での花粉密度の最大値は 229 粒、圃場から約 3 m で 43 粒であり (DIVERLY, 1999)、開花最盛期に 1 cm² 当たり 150 粒の花粉が葉上に載っている葉の割合は 1 m の距離で 12%、2 m で 0% であり、降雨により葉上の 90% の花粉が流れ落ちる (PLEASANTS et al., 1999) ことなどが報告された。また、オオカバマダラ幼虫が Bt 花粉を摂食して半数死亡する花粉密度 (LC₅₀) は 1,500 粒/cm² とされた (SEARS, 1999 b)。今回の緊急調査では、普通種のヤマトシジミやモンシロチョウ幼虫等で摂食試験を行ったが、感受性の比較的高いヤマトシジミ幼虫が半数以上死亡する花粉密度は 4,000 個/cm² 程度であり、チョウの種ごとに感受性が異なっていた。

以上をまとめると、我が国においては、希少種が耕作圃場内に生息することはまずないと考えられ、また、上記のことから葉に落下した Bt 花粉がチョウの幼虫に影響する密度になるのは、圃場からの距離が極めて限られた範囲であると考えられる。したがって、Bt トウモロコシが既存の農地に栽培されても、希少種のチョウ目への影響はほとんど無視できる程小さいと考えられる。また、ヤマトシジミなどの普通種が圃場ぎわで若干影響を受けたとしても、その地域における分布範囲との関係から見て、Bt 花粉が地域個体群に及ぼす影響は無視できる程小さいと考えられる。

4 Bt トウモロコシの栽培種についての新たな環境影響評価項目の設定

農林水産省は今回の緊急調査を踏まえ、供試された

Bt トウモロコシの系統以上に花粉中に Bt トキシン含量の多い系統が栽培される可能性を考慮して、Bt トウモロコシの環境への安全性の確認に際して、従来の評価項目に加えて、次のような新たな評価項目を追加した。すなわち、花粉中の Bt トキシンについて、①化学的定量法による検出、②生物検定による検出、③ Bt トウモロコシとその兄弟系統等での発現量の調査を行うこと、さらに、もし、花粉の大きさ、花粉量、開花時期・期間等の生殖特性が従来の系統の幅を超える場合には、花粉飛散距離と落下花粉数、並びにこれらの関係の調査を行い、特に、開花時期・期間が従来の系統の変異幅を超えるときには、環境庁レッドデータブックに記載されたチョウ目昆虫への影響を調査することが定められた。

おわりに

21 世紀には、遺伝子の解読や機能解明が一層進み、環境耐性、機能性、収量性、省力性等を有する遺伝子組換え作物が次々と開発されてくると見込まれる。こうした状況の下で、食と環境への安全性を科学的に確保しながら社会的受容 (PA) を進めていくことが、バイオテクノロジーの成果を国民の福祉と産業の活性化に繋げる道であるとする。今後、遺伝子組換え作物の開発とともに、安全性評価の研究を車の両輪として進めていくことがますます重要になると考える。

引用文献

- 1) HAMA, H. et al. (1992): Appl. Ent. Zool. 27: 355~362.
- 2) HILBECK, A. et al. (1998 a): Environ. Entomol. 27: 480~487.
- 3) ——— et al. (1998 b): ibid. 27: 1255~1263.
- 4) HUANG, F. et al. (1999): Science 284: 965~967.
- 5) 飯塚敏彦 (1995): 植物防疫 49: 466~471.
- 6) LIU, Y. B. et al. (1999): Nature 400: 519.
- 7) LOSEY, J. E. et al. (1999): ibid. 399: 214.
- 8) MCGAUGHEY, W. H. and R. W. BEEMAN (1988): J. Econ. Entomol. 81: 28~33.
- 9) 森下正彦・東勝千代 (1987): 関西病虫研報 29: 17~20.
- 10) RISSLER, J. and M. MELLON (1999): 遺伝子組み換え作物と環境への危機, 合同出版, 東京, p. 205.
- 11) ROUSH, R. T. et al. (1990): J. Econ. Entomol. 83: 315~319.
- 12) SAXENA, D. et al. (1999): Nature 402: 480.
- 13) SHELTON, A. M. et al. (1993): J. Econ. Entomol. 86: 697~705.
- 14) SCHULER, T. H. et al. (1999): Nature 400: 825~826.
- 15) TABASHNIK, B. E. (1994): Annu. Rev. Entomol. 39: 47~79.
- 16) 田中 寛・木村 裕 (1991): 応動昆 35: 253~255.
- 17) TISLER, A. M. and G. W. ZEHNDER (1990): J. Econ. Entomol. 83: 666~671.

文献は一部省略。