展

望

遺伝子組換え技術

— 遺伝子組換え農作物の現状 —

坂井美穂・田中宥司

農林水産省農業生物資源研究所

2001 年 4 月から消費者向けに遺伝子組換え農産物やその農産物を原料とする食品の表示が義務化される。この表示義務化報道以来、遺伝子組換えに対する消費者の関心が急速に高まりつつある。本稿では、遺伝子組換え農作物について正しく理解していただくために、遺伝子組換え技術について紹介し、その実用化の現状について紹介していく。

1. はじめに

1999 年 7 月、農林水産省は消費者向けに遺伝子組換え農産物やその農産物を原料とする食品の表示義務化の原案を固めた。この原案における義務化の対象はダイズやトウモロコシ、ジャガイモとそれを原料とする加工食品になる。加工食品では、組み換えた遺伝子 (DNA) やその遺伝子がつくるタンパク質を科学的に検出した場合、2001 年 4 月から遺伝子組換え食品であると表示しなければならない。この表示義務化報道以来、遺伝子組換えに対する消費者の関心が急速に高まりつつある。現在、スーパーなどで遺伝子組換え農作物の使用、不使用、分別不可などの表示がされているが、この遺伝子組換え農作物を原材料に使用した食品に関して、その安全性に対する不安や疑問から消費者団体を中心にした強硬な反対意見など反響はかなり大きいといえる。

一方で、現在、日本の食糧自給率は 40% 程度であり、そのうち、穀物自給率は 30%、豆腐、しょう油などの原料となるダイズの自給率は 2%、ナタネについては 1% に満たない状況である。日本はダイズを年間約 500 万 t、トウモロコシは約 1,500 万 t 輸入しており、作付け面積の 3 割が遺伝子組換え品とされるアメリカからの輸入率はダイズでは 7~8 割、トウモロコシにいたっては 9 割近くにも及んでいる。これら義務化の対象の農作物のほとんどは国内で自給することができず、輸入に依存せざるをえない。このことから遺伝子組換え農作物や食品を完全に否定できな

いのも事実である。

そこで本稿では、遺伝子組換え農作物について理解していただくために、その現状について紹介していく。

2. 遺伝子組換え農作物の歴史

21 世紀を目前にして、人類は人口爆発とそれに伴う食糧危機、地球規模での環境悪化、化石エネルギーの枯渇など、問題が山積みの状態である。そして、西暦 1900 年の世界人口は 16 億人だったのに対し、1999 年 10 月 12 日、世界人口は 60 億人を突破した。この 1 世紀の間に 44 億人も増えたことになる。そして、この人口増加を支えているものは科学技術や農業技術のめざましい進歩であるといえる。

1973 年にカリフォルニアで産声をあげた遺伝子組換え技術¹⁾は、現在、農作物の品種改良 (初期の遺伝子組換え農作物は除草剤耐性や害虫耐性など、生産性向上に寄与するものが大多数を占めている。)を中心とした農業分野での利用が急速に進んでいる。1994 年にアメリカのカルジーン社がアンチセンス遺伝子を導入した日持ちの良いトマトが世界ではじめて販売された²⁾。これが世界ではじめて実用化された遺伝子組換え農作物になる。このトマト以外にもアメリカやカナダ、アルゼンチンなどで遺伝子組換え農作物が数多く実用化されている。そして、1996 年秋、わが国でも、厚生省においてダイズやトウモロコシなど 7 品種の遺伝子組換え農作物の認可を皮切りに、1999 年 11 月末

Miho SAKAI 農林水産省農業生物資源研究所 (305-8602 つくば市観音台 2-1-2) 生物工学部生殖制御研究室・生研機構派遣研究員、工博 (写真左)

1999 年熊本工業大学大学院工学研究科博士課程修了。専門は遺伝子工学。〈趣味〉花の写真を撮ること

Hiroshi TANAKA 同上・室長、農博

1992 年東京大学大学院農学系研究科博士課程修了。専門は分子生物学、分子育種 (植物)。〈趣味〉読書、相撲観戦

Gene Manipulation: Genetically Modified Crops

現在、29 品種について安全性評価が行われ、輸入可能となっている(表 1)³⁾。このように今後も遺伝子組換え食品としての遺伝子組換え農作物が増えてくるものと思われる。

3. 農林水産業や食品における遺伝子組換え技術のメリット

農林水産業や食品における遺伝子組換え技術のメリットとはどのようなものなのだろうか。

遺伝子組換え技術とは動植物や微生物の遺伝子に有用な情報を組み込む技術のことをいう。この技術を利用して、農作物においては、新品種の開発、生産工程の効率化などを可能にすることができる。

従来の交配技術に比べ、遺伝子組換え技術を用いたもっとも大きなメリットは、作物の育種期間が短縮されることである。たとえば、あらかじめ機能がわかっている遺伝子を直接、作物の遺伝子中に組み込むことができるので、従来の交雑を重ねる品種改良法を用いるより、短期間で作物を改良することが可能になるのである。また、遺伝子組換えの場合には、「導入する目的遺伝子の長さが特定されていて、機能(形質)がわかっているペプチド」を導入することになるので、正確な育種を行うことができる。従来の方法では、交配を重ねていくため、目的の形質にかかわる遺伝子以外に他のいろいろな

表 1 厚生省による遺伝子組換え農作物の安全性評価

	品種	商品名	性質	申請者	安全性確認日	開発者
1	ダイズ	ラウンドアップ・レディ・大豆	除草剤耐性 (グリホサート)	日本モンサント(株)	H8. 9. 3.	Monsanto Company (米国)
2	ナタネ	ラウンドアップ・レディ・カノーラ	除草剤耐性 (グリホサート)	日本モンサント(株)	H8. 9. 3.	Monsanto Company (米国)
3	ジャガイモ	ニュー・リーフ・ポテト	害虫抵抗性 (コロラドハムシなど)	日本モンサント(株)	H8. 9. 3.	Monsanto Company (米国)
4	トウモロコシ	Bt 11	害虫抵抗性 (アワノメイガなど)	日本モンサント(株)	H8. 9. 3.	Northrup King Company (米国)
5	ナタネ	イノベータ	除草剤耐性 (グルホシネート)	ヘキスト・シェーリング・アグレボ(株)	H8. 9. 3.	AgrEvo Canada Incorporated (カナダ)
6	ナタネ	PGS 1	除草剤耐性 (グルホシネート)	ヘキスト・シェーリング・アグレボ(株)	H8. 9. 3.	Plant Genetic Systems (ベルギー)
7	トウモロコシ	Event 176	害虫抵抗性 (アワノメイガなど)	日本チバガイギー(株)	H8. 9. 3.	Ciba-Geigy Corporation (米国)
8	トウモロコシ	イールドガード・トウモロコシ Mon 810	害虫抵抗性 (アワノメイガなど)	日本モンサント(株)	H9. 5. 26.	Monsanto Company (米国)
9	ジャガイモ	ニューリーフジャガイモ (スーベリア・アトランティック品種)	害虫抵抗性 (コロラドハムシなど)	日本モンサント(株)	H9. 5. 26.	Monsanto Company (米国)
10	ワタ	インガード・ワタ	害虫抵抗性 (オオタバコガ)	日本モンサント(株)	H9. 5. 26.	Monsanto Company (米国)
11	トウモロコシ	T 14, T 25	除草剤耐性 (グルホシネート)	ヘキスト・シェーリング・アグレボ(株)	H9. 5. 26.	Hoechst Schering AgrEvo GmbH (ドイツ)
12	ナタネ	PHY 14, PHY 35	除草剤耐性 (グルホシネート)	ヘキスト・シェーリング・アグレボ(株)	H9. 5. 26.	Plant Genetic Systems (ベルギー)
13	ナタネ	PGS 2	除草剤耐性 (グルホシネート)	ヘキスト・シェーリング・アグレボ(株)	H9. 5. 26.	Plant Genetic Systems (ベルギー)
14	ナタネ	PHY 36	除草剤耐性 (グルホシネート)	ヘキスト・シェーリング・アグレボ(株)	H9. 5. 26.	Plant Genetic Systems (ベルギー)
15	ナタネ	T 45	除草剤耐性 (グルホシネート)	ヘキスト・シェーリング・アグレボ(株)	H9. 5. 26.	Hoechst Schering AgrEvo GmbH (ドイツ)
16	ワタ	ラウンドアップ・レディ・ワタ (1445 系統)	除草剤耐性 (グリホサート)	日本モンサント(株)	H9. 12. 16.	Monsanto Company (米国)
17	ワタ	BXN cotton	除草剤耐性 (プロモキシニル)	日本モンサント(株)	H9. 12. 16.	Calgene Incorporated (米国)
18	ナタネ	MS 8 RF 3	除草剤耐性 (グルホシネート)	ヘキスト・シェーリング・アグレボ(株)	H9. 12. 16.	Plant Genetic Systems (ベルギー)
19	ナタネ	HCN 10	除草剤耐性 (グルホシネート)	ヘキスト・シェーリング・アグレボ(株)	H9. 12. 16.	Hoechst Schering AgrEvo GmbH (ドイツ)
20	トマト	フレイバーセーバートマト	日持ち性の向上	麒麟麦酒(株)	H9. 12. 16.	Calgene Incorporated (米国)
21	ナタネ	MS 8	除草剤耐性 (グルホシネート)	ヘキスト・シェーリング・アグレボ(株)	H10. 12. 14.	Plant Genetic Systems (ベルギー)
22	ナタネ	RF 3	除草剤耐性 (グルホシネート)	ヘキスト・シェーリング・アグレボ(株)	H10. 12. 14.	Plant Genetic Systems (ベルギー)
23	ナタネ	WESTAR-Oxy-235	除草剤耐性 (オキシニル系)	ローヌ・プーラン油化アグロ(株)	H11. 11. 29.	Rhone-Poulenc Agrochimie (カナダ)
24	ワタ	Bollgard with BXN cotton	害虫抵抗性 (オオタバコガ) 除草剤耐性 (プロモキシニル)	日本モンサント(株)	H11. 11. 29.	Calgene Incorporated (米国)
25	テンサイ	T 120-7	除草剤耐性 (グルホシネート)	アグレボ・ジャパン(株)	H11. 11. 29.	Hoechst Schering AgrEvo GmbH (ドイツ)
26	トウモロコシ	DLL 25	除草剤耐性 (グルホシネート)	日本モンサント(株)	H11. 11. 29.	Dekalb Genetics Corporation (米国)
27	トウモロコシ	DBT 418	除草剤耐性 (グルホシネート)	日本モンサント(株)	H11. 11. 29.	Dekalb Genetics Corporation (米国)
28	トウモロコシ	ラウンドアップ・レディ・トウモロコシ (GA 21)	除草剤耐性 (グリホサート)	日本モンサント(株)	H11. 11. 29.	Monsanto Company (米国)
29	ナタネ	PHY 23	除草剤耐性 (グルホシネート)	アグレボ・ジャパン(株)	H11. 11. 29.	Plant Genetic Systems (ベルギー)

遺伝子も一緒に導入され、組換えを起こしている。そして、私たち人類にとって都合の良い形質をもつものを選抜してきたのである。遺伝子組換え技術は、従来交配が難しかった作物間でも有用遺伝子を取り出して付加することが可能になるので、改良範囲が広がることになる。

このように、遺伝子組換え技術は特殊な技術ではなく、品種改良を目的とした従来の組織培養や薬培養、細胞融合技術などの方法の延長線にある技術といえる。

次に、遺伝子の導入法をいくつか紹介していく。

4. 遺伝子の導入法⁴⁾

4.1 アグロバクテリウムを利用した遺伝子導入法

植物にある特定の遺伝子を導入する方法としては、これまでに数々の方法が考案されているが、もっとも安定的に形質転換体を得ることができるのは、現在のところアグロバクテリウム ツメファシエンスを利用した方法である(図1)。アグロバクテリウム ツメファシエンスは、多くの双子葉植物に感染してクラウン・ゴールという植物のコブを誘発する土壌細菌である。このコブを誘発する原因となるのが、アグロバクテリウム ツメファシエンスのもつ Ti プラスミドである。植物にアグロバクテリウム ツメファシエンスが感染すると Ti プラスミド上にある T-DNA は、Ti プラスミド上の別の領域に存在する Vir 領域の遺伝子産物によって、植物細胞の染色体に組み込まれる。T-DNA 上には植物ホルモンであるオーキシンやサイトカイニンなどの植物ホルモンを産生する遺伝子が存在するため、感染した植物細胞はこれらの植物ホルモンの影響によりクラウン・ゴールを形成する。T-DNA の両端は 25 bp からなる特異的な反復配列に挟まれており、T-DNA はこの領域で切り出され、植物細胞の染色体に組み込まれる。このアグロバクテリウム ツメファシエンスの感染によるクラウン・ゴール形成は、自然界にみられる植物形質転換系の例としてとらえることができる。

このアグロバクテリウム ツメファシエンスを用いて遺伝子組換え植物をつくる方法として、リーフディスク法がよく用いられている。

4.2 エレクトロポレーション法

エレクトロポレーション法とは、植物の細胞壁を取り除いたプロトプラスト状態の細胞と導入したい外来の有用遺伝子とを混合して、その溶液に短時間、高電圧パルスを与えることにより、プロトプラストの細胞膜に一時的な穿孔をあけ、植物細胞中に目的の外来遺伝子を導入することで植物の染色体中に組み換える方法である。

4.3 パーティクルガン法

パーティクルガン法とは、金やタングステンなどの金属

図1 アグロバクテリウムによる植物の形質転換法

微粒子の表面に必要な遺伝子をまぶして、これを火薬や圧縮ガスを用いて目的とする作物の組織に打ち込むことで、染色体中に組み込む方法である。

これらのほかにも、微小な管を使って直接細胞内に外来遺伝子を導入するマイクロインジェクション法など、いろいろな遺伝子の導入法が開発されている。これらの方法を用いる際に、植物への導入した遺伝子を確認するためのマーカー遺伝子が必要になるが、このマーカー遺伝子は導入したい遺伝子と同じベクター上に組み込んで植物細胞に導入し、マーカーの発現の有無を見ることで導入した遺伝子をもった組換え細胞を効率よく選抜することができる。

次に、このような技術を用いて作られ、実用化されている農作物について見ていきたいと思う。

5. 有用な形質を付与した新たな品種の開発

5.1 害虫抵抗性⁵⁾

導入された昆虫抵抗性遺伝子は土壌細菌であるバシラス チューリンゲンシスの *bt-2* 遺伝子といわれるものである。この *bt-2* 遺伝子産物は、 δ -エンドトキシンといわれ、ガや甲虫類などに対して殺虫作用がある。 δ -エンドトキシンは高い特異性をもっており、脊椎動物には毒性がない。*bt-2* 遺伝子の殺虫性を発揮する領域を植物に導入した結果、遺伝子組換え農作物は害虫によるダメージが軽減されることになる。

害虫による被害は軽視できるものではなく、アメリカでは、アワノメイガによりトウモロコシ栽培で毎年 1,000 億円以上の被害が出ている。この技術を利用すれば、農業に頼らず、しかも、薬剤の使用も大幅に減らすことができるため、農家にとっても作業やコストの軽減化が可能になる。また、薬剤使用が減ることにより、環境保全にも役立つことになる。このようにして作り出された農作物は、トウモロコシ、ワタ、ジャガイモなどがあり、アメリカ、カナダで実用化されている。また、これらのうち、いくつかはわが国でも食品として厚生省の認可がなされている。

5.2 ウイルス抵抗性⁶⁾

植物があるウイルスに感染すると、そのウイルスの近縁のウイルスによる二重感染から保護される現象(干渉作用)が知られている。Powell Abel らのグループはタバコモザイクウイルス(TMV)のコートタンパク質遺伝子を植物体内で発現させることで、この干渉作用を再現できるのではないかと考えた。まず、コートタンパク質遺伝子をタバコに導入し、植物体内でコートタンパク質をつくらせ、

その結果、外部からの TMV 感染に対し、遺伝子組換えタバコではその症状が軽減された。この研究はトマトにも応用され、この手法による TMV 抵抗性形質転換トマトの圃場試験が農林水産省により、国内ではじめて実施された。ウイルスによる被害はトマトに限らず、農作物全体から見ても主要な病害のひとつであるが、有効な薬剤はなく、その防除は感染を回避するような間接的手段に頼らざるをえないのが現状である。

遺伝子操作技術により、作物にウイルス抵抗性を付与し、実用化できれば育種上の貢献は大きいと考えられる。この技術は TMV 以外のウイルスにも応用が可能であり、本技術を用いて、ウイルス抵抗性を付与したパパイヤがアメリカにおいて実用化されている。

5.3 除草剤抵抗性⁷⁾

近年、安全性の高い除草剤の開発が行われ、実用化されているが、これらの除草剤は雑草と作物を区別しえない非選択性のものが多いのが現状である。農作物を栽培する際には、雑草や作物の種類にあわせていくつかの除草剤を播種から収穫までに数回散布している。これに対し、非選択性の除草剤とこの除草剤に耐性の作物をペアにして栽培すれば、もっとも効果的な時期に除草剤を散布することができ、散布量も少なくてすむ。このことは環境にやさしい農業が可能になるばかりでなく、農家にとっても作業、コストの軽減が可能となる。

除草剤抵抗性といっても、いくつか種類があるが、アミノ酸生合成系に作用部位をもつ除草剤に対して抵抗性（グリホサート抵抗性やグリホシネート抵抗性）を付与したダイズやナタネなどがアメリカ、カナダで実用化されている。また、わが国でも食品として厚生省の認可がなされている。

このほかにもパラコートやプロモキシニールに対して抵抗性を付与した作物も作出されている。

5.4 アンチセンス遺伝子導入による日持ち性を向上させたトマト⁸⁾

メッセンジャー RNA に対して相補的な配列をもつ RNA をアンチセンス RNA という。自然界においてアンチセンス RNA による遺伝子発現の制御は細菌において見られるが、高等植物では知られていない。しかしながら、植物においても遺伝子導入したアンチセンス RNA が本来の遺伝子の発現を抑制する現象が発見され、トマト育種にも応用された。この技術を用いて作出されたトマトは世界ではじめてアメリカにおいて発売された遺伝子組換え作物である。このトマトは生食用として発売されたが、その後、同様な技術を用いて加工用トマトでもイギリスで実用化がなされた。

以上、これまでに実用化がなされている作物についてそのおもなものを紹介した。このほかにも花粉が形成される

時期に葯の特異的な部位で外来の RNA 分解酵素遺伝子を発現させてつくられた雄性不稔ナタネも育成されている。このように現在、実用化を目指して数多くの研究が進められており、今後ますます遺伝子組換え作物の実用化が進むものと考えられる。

6. おわりに

これまで商品化されてきた遺伝子組換え作物は、ほとんどが欧米諸国で開発されたものであるが、国内でも実用化に向けた研究が数多くあり、今後ますます遺伝子組換え作物が商品化されてくるものと考えられる。一方でこれらの遺伝子組換え作物や食品に対する安全性について社会的な不安が持ち上がってきている。しかしながら、これらの遺伝子組換え作物や食品については実験段階から「組換え DNA 実験指針」に基づいて研究・調査され、また、実用化のための研究段階では「農林水産分野等における組換え体の利用のための指針」に基づき、環境への影響など調査が行われている。さらに、食品としての安全性については、厚生省の「組換え DNA 技術応用食品・食品添加物の安全性評価指針」に基づき、食品としての安全性などが評価されている。このように遺伝子組換え農作物や食品に対して、慎重なチェックが繰り返し行われている。

遺伝子組換え技術は比較的新しい技術であり、一般の人々が不安や疑問をもつのは当然のことだと思われる。一般の人々の不安や疑問に応えるために、より開かれた情報の開示、産・学・官や一般の人々を加えた幅広い議論と正しい理解・協力が必要だと考える。

遺伝子組換え技術は 21 世紀を支える技術のひとつであり、いたずらに不安感をあおるのは得策ではない。これまで積み上げ、築きあげてきた「人類の知恵」を正しく後世の人々に伝えていきたいものである。

文 献

- 1) S. Cohen, A. Chang, H. Boyer, R. Helling: *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **70**, 3240 (1973)
- 2) 大山莞爾, 天知輝光, 坂崎 潮: 「世界を制した植物たち」, 学会出版センター (1997), p. 264
- 3) 厚生省遺伝子組換え食品ホームページ: http://www.mhw.go.jp/topics/identshi_13/index.html
- 4) 大沢勝次: 植物バイオテックの基礎知識, 農文協 (1994)
- 5) Perlak, F. J., R. W. Deaton, T. A. Armstrong, R. L. Fuchs, S. R. Sims, J. T. Greenplate, D. A. Fischhoff: *Bio/Technology*, **8**, 939 (1990)
- 6) Lawson, C., W. Kaniewski, L. Haley, R. Rozman, C. Newell, P. Sanders, N. E. Tumer: *Bio/Technology*, **8**, 127 (1990)
- 7) De Block, M., J. Botterman, M. Vandewiele, J. Dockx, C. Thoen, V. Gossele, N. Rao Movva, C. Thompson, M. Van Montagu, J. Leemans: *EMBO J.*, **6**, 2513 (1987)
- 8) 田中宥司: 遺伝, **47**, 58 (1993)