

除草剤耐性遺伝子組換え作物の現状と課題

茨城大学農学部附属フィールドサイエンス教育研究センター 佐合隆一

はじめに

ISAAA (国際アグリバイオ事業団) の報告によると、2011年に商業栽培された遺伝子組換え (GM) 作物の面積は、1億6,000万ヘクタールとされ (表-1)、全世界29カ国の1,670万農家が栽培していると報告されている。29カ国のうち19カ国が発展途上国であり、2011年に最も栽培面積を増加させた国はブラジルで490万ha、次いでアメリカが220万ha、カナダ160万haであった。その結果、GM作物の作付面積は、1996年以来、毎年8%、1,200万haの増加をつづけていることになる。GM作物の栽培面積がもっとも大きい国はアメリカであり6,900万ha、次いでブラジル3,030万ha、アルゼンチン2,370万ha、インド、カナダ、中国、パラグアイ、パキスタン、南アフリカ、ウルグアイの順で、これらの国で100万ha以上の栽培が行われている。南北アメリカとアジアでの栽培が多いことが顕著である。

こうした中で、わが国では除草剤耐性GM作物の実用栽培は行われておらず、技術の後進性を懸念する声も聞かれる (日本学会会議2010)。この除草剤耐性GM作物を利用した雑草防除を評価するために、筆者はアメリカで現地調査 (2007年~2009年、7月~8月) を行うとともに、2012年にブラジルで開催されたICSC (国際作物学会議) に出席する機会を得て、会議報告および現地圃場でいくつかの知見を得たので、これらの情報および文献情報に基づいて、GM作物による雑草防除が日本において必須の防除技術であるか、また化学的防除の欠点を補う革新的技術であるかについて述べることにする。

アメリカ合衆国での除草剤耐性GM作物の普及状況

アメリカはGM作物栽培の先進国であり、1996年に商業栽培してから、2011年においても全GM作物栽培面積の43%のシェアを占め

表-1 世界の遺伝子組換え作物栽培面積 (×100万ha)

形質	2011年	同左%	2010年比増減
除草剤耐性	93.9	59	4.6
Stack 系統	42.2	26	9.9
殺虫抵抗性 (Bt)	23.9	15	-2.4
ウイルス抵抗性/他	<1	<1	<1
合計	160	100	12

ている。USDA (米国農務省) の発表によると、2012年度の大豆栽培面積 (3,080 万 ha) の93%が除草剤耐性GM品種である。また、トウモロコシ作付面積 (3,901 万 ha) の88%がGM品種であり、そのうち21%が除草剤耐性GM品種、害虫抵抗性と除草剤耐性の両方の性質をもつ (スタック) GM品種は52%、害虫抵抗性(Bt)だけでもつGM品種は15%と予測されている。さらに、ワタは栽培面積 (510 万 ha) の94%がGM品種であり、その17%が除草剤耐性GM品種、害虫抵抗性と除草剤耐性の両方の性質をもつ (スタック) 品種は63%、害虫抵抗性(Bt)だけでもつ品種は14%と推定されている。このようにGM作物の大部分が除草剤耐性GM品種であり、必要に応じて害虫抵抗性(Bt)GM品種となっている。

ブラジルでの除草剤耐性 GM 作物の普及状況

ブラジルは2009年以後に世界で最もGM作物の栽培面積を増加させた国であり、同国の3作物 (大豆、トウモロコシ、ワタ) の栽培面積の75%がGM品種である。ブラジルにおける2011/12年の大豆作では、栽培面積 (2,500 万 ha) の83%が除草剤耐性GM品種であり、0.3%が害虫抵抗性と除草剤耐性の両方の性質をもつ (スタック) 品種である。夏期作のトウモロコシでは、栽培面積 (829 万 ha) の54%がGM品種であり、うち除草剤耐性GM品種が5%、害虫抵抗性と除草剤耐性の両方の性質をもつ (スタック) 品種が17%、害虫抵抗性(Bt)だけでもつ品種が32%とされている。冬期作のトウモロコシでは、栽培面積 (575 万 ha) の80%がGM品種であり、うち除草剤耐性GM作物が11%、害虫抵抗性と除草剤耐性の両方の性質をもつ (スタック) 品種が41%、害虫抵抗性(Bt)だけでもつ品種

が29%とされている。ワタでは、栽培面積 (155 万 ha) の39%がGM品種であり、うち除草剤耐性GM品種が14%、害虫抵抗性と除草剤耐性の両方の性質をもつ (スタック) 品種が16%、害虫抵抗性(Bt)だけでもつ品種が9%と推定されている。トウモロコシおよびワタでの害虫抵抗性(Bt)GM品種の割合がアメリカに比べやや大きく、除草剤耐性GMの必要性がアメリカに比べやや低いものと思われる。

GM作物栽培によるメリット

GM作物栽培によるメリットについて、James (2011)をはじめさまざまな報告があるが、概要は次のとおりである。1) 多収獲による増収と生産コストの低減による食物、飼料、繊維の安定的確保や自給率の向上による食料安全効果 (784 億USドル: 1996-2010年)、および既存農地での生産性の安定化による飢饉の減少、2) 農薬の節減効果 (44,300 万 kg a.i.: 1996-2010年)、および農業による環境負荷の低減や農業用水の有効化、3) CO₂削減による、干ばつや洪水、気象変動、海水面の上昇、塩類集積、気温変化などに対する環境変化の緩和 (2010年のみで190億 kgCO₂: 900 万台の自動車削減相当)、4) 既存の農耕地における生産性の向上により農耕地の削減 (9,100 万 ha 相当) が可能となり、それにとりまう林地の保全およびその中の種の多様性保全、5) 最貧国 1,500 万小農家の貧困の緩和、貧困者の70%を占める発展途上国での経済的・健康的・社会的発展による飢餓・栄養不良の緩和、などであり、GM種子の価値は2011年で130億USドル、GM種子からの最終製品の穀物での利益は1,600億USドルに相当すると報告している。

GM作物の多収性

現在実用化されているGM作物が世界の穀物の増収と収量の安定性に貢献していることが、多く報じられている。このことは1996年から2012年までに実用化されている品種がその特性として多収性を有していたのかを見極める必要がある。

これまで実用化されているGM作物は、除草剤耐性と害虫抵抗性(BT)であり、直接的な因果関係としては、1) これまでの作物(品種)では使用できなかったglyphosateを、作物の生育中に使用可能となったことにより、雑草害を著しく軽減できたこと、2) BT剤に有効な害虫に対して、安定的な効果を発揮することにより、被害の軽減化を図ることができたことによる増収効果があると考えられる。これらの増収効果は、慣行栽培で雑草や害虫の防除が十分に行なうことができる農家にとっては、必ずしも顕在化しない増収効果である。

Zulauf (2011) は、アメリカにおけるGMの代表的3作物(トウモロコシ、ダイズ、ワタ)と他11作物について、GM作物普及前の1940年から1995年の単位面積当たり収量とGM作物普及後の1996年から2011年までの収量を比較し、3作物の収量増加の直接的理由としてGMによると言えないが、1996年から2011年の収量が継続(直線)的に増加していることから、GM作物がこの増収効果に貢献していると結論付けている。

一方、ブラジルでは2005年からGM大豆栽培が全面的に合法化され、当時のGM大豆品種は従来品種に比べ多収ではなく、農家も「多収性」の意識はほとんどなかったと言われている。しかし、ブラジルは国家戦略として大豆栽培に力を入れ、1) 農業研究所、教育、栽培指導機関の

充実、2) 全世界から有用遺伝子を導入した品種開発、3) サバナ(セラード)地区の施肥法等の栽培研究の成果などを踏まえ、地域ごとの適品種選定、窒素固定菌の利用、適正な病虫害防除と抵抗性品種の育成、不耕起・最小耕耘栽培の確立を実施することにより、大幅な単位面積当たりの収量増加を実現させた。特に品種開発の成果は顕著であり1998年までは年間10品種程度の育成であったのに対して1999年以後は年間50品種が育成されており、ダイズは2003年以後、ワタは2005年以後、トウモロコシは2008年以後に育成された品種には除草剤耐性遺伝子や害虫抵抗性遺伝子を組み換えた品種が含まれており、年々その割合が増加している。さらに、国家バイオ安全技術委員会(CTNBio)は効率的で迅速な栽培の認可をすすめ、ブラジル農牧研究公社(EMBRAPA)は強力なGM作物導入プログラムによりGM作物栽培を推進している。アメリカにおいても1997年~1998年のアメリカ農務省の調査では、GM大豆の収量や農家が得る純利益は、非組換え品種との間にほとんど差がなかった(Gianessi 2008)。GMトウモロコシについてもほぼ同様であり、多収性品種にGMを行うとともに、多収獲栽培を可能にする形質をもつ品種を普及させることにより実現している。このため、モンサント社は種子会社の買収や技術の提供により、有望な多収性品種に除草剤耐性の遺伝子組換えや害虫抵抗性遺伝子組換え品種の開発を実現し、「収量増」をGM大豆品種のセールスポイントとして普及させている。すなわち、収量増は1つの遺伝子で決まる形質ではないため、将来的には多収性をもつ遺伝子が解明され、多収性のGM作物の開発の可能性があるが、現在まで実用化されているGM作物は、これまでよりも多収性の品種に除草剤

耐性の遺伝子や害虫抵抗性遺伝子が組換えられているだけであり、GM作物の「多収性」は、間接的効果であるが、農家は新品種導入により多収性を実現できる点をメリットとして評価しているにすぎないことに、私たちは留意をすることがある。

GM作物による環境保全機能

Brookes ら (2012)によると、1996年から2010年までの農家段階でのGM作物導入による利益は784億(うちアメリカは353億)USドルであり、うち40%は耕耘の削減、農薬散布回数の削減、省力化などによる生産コストの低減とされている。同様に2010年度の場合、農家段階でのGM作物導入による利益は140億(うちアメリカは55億)USドル、うち24%は生産コストの低減によるものとされている。農薬散布作業にともなうコスト(農薬費、散布作業費)およびこれら作業に要するエネルギー消費は直接的な削減効果として期待できる。

アメリカでは1990年代に、おもに土壌流亡による農地保全上の理由からいわゆる保全耕法(conservation tillage)が奨励され、土壌を耕うんするのではなく、作物残さをできるだけ土壌表面に残す不耕起(no-tillage)や溝耕(ridge-tillage)、被覆耕(mulch-tillage)などの耕法が普及しはじめた。その際、保全耕法の普及に伴い、問題となる多年生雑草に有効で茎葉処理可能な除草剤が必要とされた。同時に、1990年代中頃からほとんどすべての土壌処理除草剤に対して、抵抗性バイオタイプの雑草が多発し始め、使用できる除草剤の組み合わせが複雑となり、農家、雑草防除業者や雑草防除コンサルタントの頭を悩ませることになっていた。こうした中で、開発されたのがglyphosate耐性を付与する遺伝子を作物に

導入し、いつの時期(経済性を考慮すると使用時期は限られるが)にでも、多年生を含む広範な雑草種に有効な除草剤であるglyphosateを使用できる新たな雑草防除技術の出現となった。すなわち、農作業における耕うん作業は農業生産上のエネルギー消費の面からみても大きな割合を占めることから、耕うん作業を簡素化する保全耕法は省エネルギー(=環境負荷低減)技術である。また、GM作物であるRound-up Ready®の出現が、不耕起栽培などの保全耕法の普及を促進し、各種除草剤の抵抗性雑草問題を解決させることとなった。しかし、この利益は本来除草剤glyphosateの利用による利益であり、非GM品種でも保全耕法でglyphosateを含む既存除草剤を合理的に使用することにより実現できる利益であって、GM作物利用による利益は間接的なものにすぎない。したがって、単位面積当たり収量の増大にともない農家が受取する利益784億USドルの40%から24%は過大見積りであり、農耕地面積の削減、種の多様性保全効果等々の環境保全効果も間接的効果である。

米国における除草剤耐性GM作物利用上の問題点

1) glyphosate 抵抗性雑草の増加

世界の除草剤抵抗性バイオタイプについては、The Herbicide Resistance Action Committee (HRAC)とThe North American Herbicide Resistance Action (NAHRAC) およびアメリカ雑草学会(WSSA)で設立したホームページ(International Survey of Herbicides Resistant Weeds : <http://www.weedscience.org/In.asp>)に掲載されている。

本ホームページによると、米国におけるglyphosate抵抗性バイオタイプは1998年にカリフォルニア州の果樹園で、*Lolium rigidum*

(ボウムギ)が最初に報告されている。1974年に米国で glyphosate が発売されてから24年後のことである。一方、diclofop-methyl (ジクロホップメチル)の場合は、1980年に上市され1987年に *Lolium multiflorum* (ネズミムギ)に抵抗性バイオタイプの出現が報告され、chlorsulfuron (クロルスルフロンの場合は、1984年に上市され1987年に *Kochia scoparia* に抵抗性バイオタイプの出現が報告された。こうした選択性除草剤に比べ glyphosate は、抵抗性の出現しにくい除草剤であったが、2000年代に入って、米国を中心に20カ国で24種の雑草に glyphosate 抵抗性バイオタイプが報告されるようになった。

HRACによると米国では抵抗性バイオタイプが *Amaranthus* 属3種 (*A. palmeri* : オオホナガアオゲイトウ13州, *A. tuberculatus* : 11州, *A. spinosus* : ハリビユ1州), *Ambrosia* 属2種 (*Ambrosia. artemisiifolia* : ブタクサ7州, *A. trifida* : クワモドキ (オオブタクサ) 11州), *Conyza* 属2種 (*C. canadensis* : ヒメムカシヨモギは21州, *C. bonariensis* : アレチノギク1州), *Lolium* 属2種 (*Lolium multiflorum* : ネズミムギ3州, *L. rigidum* 1州), *Sorghum halepense* : セイバンモロコシ3州, *Poa annua* : スズメノカタビラ1州, *Kochia scoparia* 4州, *Eleusine indica* : オヒシバ2州で、合計14種が2012年現在において560万ヘクタール以上で出現していると報告されている。このうち *Conyza canadensis* は筆者が調査したほぼ全米州の道路脇、圃場周辺や樹園地、畑地に分布がみられる。*C. canadensis* が、畑作地の周辺に群落を形成しているケースや樹園地などに生育して、圃場への種子供給源となっている現場を多く観察していることや、風散布型のおびただしい種子を生産

する本種の特長から、農耕地以外の場所で生育した抵抗性個体が作物畑や裸地化している場所に定着して、拡大していることも考えられる。*Amaranthus palmeri* は著者が調査した畑作地帯のどこにでも観察されることから、これらの種に glyphosate 抵抗性バイオタイプが出現し、拡大した場合には深刻な事態を招くと考えられる。また、筆者の調査した全米各地の畑地、樹園地、野菜畑、圃場周辺で *Amaranthus* 属の雑草として、*A. tuberculatus* (ホナガアオゲイトウ類) や *A. retroflexus* (アオゲイトウ) などが観察された。これらの種は交雑の可能性もあることから、それぞれの種間関係や交雑後の動向にも注目する必要があるものと思われる。

2) glyphosate 抵抗性雑草対策

モンサント社は適切な抵抗性雑草の回避策として下記の9項目の実践を上げている。

- 1) 除草剤処理前後の圃場における残存雑草の観察
- 2) 栽培時に残存雑草がないように耕起前の除草剤散布または耕起を行う
- 3) 雑草が小さい生育初期に防除する
- 4) 必要に応じて、glyphosate 耐性 GM 作物栽培の一環として、他の作用機作をもつ除草剤 (選択性除草剤や土壌処理除草剤) との体系防除や耕種防除 (耕耘や輪作) を行う
- 5) glyphosate 耐性 GM で他の作物への輪作を行う場合には他の除草剤を併用する
- 6) 適正な glyphosate 剤を適正薬量で、適正な時期に使用する (glyphosate 薬量 1540g/ha 雑草の草丈10センチ以下で散布)
- 7) 枯れ残りの雑草が残っている場合には、種子を実らせる前に除去する
- 8) 圃場間の移動時には機械類をきれいにして

種子の拡散, 移動をさける

- 9) できるだけ雑草種子混入のない種子を購入して更新する

こうした除草剤抵抗性雑草対策は既存剤における対策と全く同様であり, 抵抗性雑草の出現地帯においてはglyphosate耐性GM作物を作付することによる諸々のメリットが消失することを意味している。

3) GM作物栽培によるコスト低減メリットの消失

除草剤耐性GM作物栽培においては, トウモロコシ, ダイズ, ワタと作物が変わっても, glyphosate 剤が独占的に使用される。そのため, アメリカにおける glyphosate 抵抗性雑草の拡大は深刻である。モンサント社は除草剤耐性GM作物栽培において「glyphosate だけに頼らないで複数の除草剤を使った雑草防除」を呼びかけ, 指示通りの除草法を実行した農家には報奨金(南部州のワタ農家には1エーカーあたり20ドル, ダイズ農家には4.5ドル払い戻す)と報じられており(Roundup Ready Plus 2012), 抵抗性雑草問題の深刻さがわかる。また, Benbrook (2009) によると, 効果不足となることを懸念し, 2006年から2008年にかけての glyphosate 剤の面積あたり散布量は年々増加しているとされている。さらに,

Muellerら(2005)はワタ栽培で *Conyza* が glyphosate 感受性の場合の防除経費は \$12.70/acre であるが, 抵抗性の場合には \$27.38/acre となる。また, *Amaranthus* の感受性の場合の防除経費は \$48.88 から \$56.26/acre で済むが, 抵抗性の場合には \$76.77 から \$82.28/acre 必要であると報告しており, glyphosate 抵抗性雑草が出現した圃場では, glyphosate 耐性GM作物利用による除草コストについてのメリットは無くなってきている。Owenらの報告によると, 2006年のダイズ作での除草剤使用量は, GMダイズの普及前に比べて, 面積あたりも生産量あたりの使用量が増大していると報じている(表-2)。すなわち, glyphosate のみによる防除ができなくなることは, 「従来の土壌処理除草剤の使用は glyphosate よりも残効性が長く, 土壌や水質への環境負荷が大きいとする」自らの主張を受け入れることとなり, 除草剤耐性GM作物の普及により, 水質浄化等の環境負荷を軽減するというメリットも失われることとなる。

一方, 害虫抵抗性GM作物の場合, 抵抗性害虫の発達抑制策として, 作付圃場に緩衝帯を設けるなどの「害虫抵抗性発達管理対策」が法的に義務付けられている。また, 1996年には害虫抵抗性GM作物は, チョウ目害虫抵抗性品種だ

表-2 アメリカ(USA)におけるダイズ生産面積と除草剤の使用量の変化

項目	1995年	2006年	原データ
ダイズ栽培面積 (エーカーx100万)	24.9	30.2	FAOSTAT (2010)
ダイズ生産量 (x100万 t)	59.2	83.5	FAOSTAT (2010)
ダイズ除草剤使用量 (x100万kga.i.)	25.65	47	CAST(2009)
(うちglyphosateの割合)	11%	89%	
ダイズ面積あたり除草剤使用量 (a.i.kg/ha)	1.03	1.56	Owen
ダイズ生産量あたり除草剤使用量(a.i.kg/大豆1t)	0.43	0.56	Owen

1995年: GM大豆普及前, 2006年: GM大豆普及10年後

表-3 ブラジルにおける Glyphosate 抵抗性雑草の報告年とその草種

学名	和名	発表年	備考
<i>Conyza bonariensis</i>	アレチノギク	2005	
<i>Conyza canadensis</i>	ヒメムカシヨモギ	2005	
<i>Conyza sumatrensis</i>	オオアレチノギク	2010	A L S と複合抵抗性
<i>Digitaria insularis</i>		2008	
<i>Lonium multiflorum</i>	ネズミムギ	2010	A L S と複合抵抗性

けであったが、2003年にはネクイハムシ（甲虫目害虫）に有効なGM品種が加わった。現在これらの両方の形質をもった掛け合わせた（スタック）品種も普及している。しかし、これらも雑草と同様に抵抗性害虫の出現が報じられている。さらに、害虫抵抗性GM作物の普及により殺虫剤の使用量が減少してきたが、ワタ栽培では対象外害虫であるカスミカメムシ類が増加してきたことや、他の作物ではアブラムシ類などの増加も報じられており、害虫抵抗性GM作物についても、対象外害虫の増加により、GM作物導入によるメリットが失われてきている。

ブラジルの大豆畑における除草剤使用

ブラジルの大豆作における除草剤使用量は、GM品種普及後に顕著に増加している。成分量換算で2003年は52,600 t、2008年は89,700 tであり、作付面積の拡大も一要因であるが、単位面積あたり使用量も増大している。すなわち、2003年のヘクタールあたり使用量は2.8kg a.i./haから2008年の使用量は4.2kg a.i./haであり、1 tの大豆生産あたり除草剤使用量は、2003年で1.0kg a.i./tであるのに対して、2008年には1.5kg a.i./tと推定されている。この間ブラジルではglyphosate耐性遺伝子導入GM大豆が急速に普及し、glyphosate剤の使用量が2倍以上の増加となったこと、すでにglyphosate抵抗性雑草が5種出現しており（表-3）、これら抵抗性

バイオタイプの出現を遅らせるために、使用薬量を多めに使用していることなどが要因となっている。さらに、抵抗性雑草対策として、paraquatおよびparaquat・diuron混合剤が、GMダイズの主要産地5州で多く使用されている。すなわち、ブラジルの2005年のparaquat使用量は65,000 Lであったのに対して、2008年は337,000Lとなっている。こうした事態は、除草剤耐性GM作物栽培により、農業使用による環境負荷が低減すると主張するメリット論の考え方を覆すものであり、除草剤一剤の寡占の使用が招く雑草防除法の問題点を明確化する例である。

スタックシステムの増大と安全性評価

glyphosate剤は、殺草スペクトラムが広く人畜や環境への安全性が高く、これまで人類が開発してきた除草剤の中でもっとも優れた除草剤であり、本剤を利用した雑草防除は最も優れた選択肢の一つであった。しかし、同一作用点の除草剤の連用や反復使用は、やがてその作用点に抵抗性をもつ雑草の出現を生じることが証明されることとなった。そのための対策として、glyphosate耐性GM作物に他除草剤のglufosinate, dicambaやsulphonylurea系剤の耐性遺伝子を導入し、多剤耐性GM作物が作出されている(Waltz 2010)（表-4）。さらにチョウ目やコウチュウ目の害虫抵抗性遺伝子を導入

表-4 開発された2,3種の除草剤耐性遺伝子組換え作物(Waltz, E. 2010)

会社名	作物	組換え遺伝子の除草剤耐性の機作
Bayer CropScience	ダイズ ワタ	HPPD inhibitors, glufosinate, glyphosate glufosinate, glyphosate
Dow Agrosiences	トウモロコシ ワタ・ダイズ	Phenoxy auxins, alyloxyphenoxypropionate, ACCase inhibitor, glyphosate 2,4-D, glyphosate
Monsant	トウモロコシ・ワタ ダイズ トウモロコシ	Dicamba, glufosinate, glyphosate Dicamba, glyphosate Dicamba, glufosinate, glyphosate
Pioneer Hi-Bred	トウモロコシ・ダイズ	ALS inhibitors, glyphosate
Syngenta	ダイズ	HPPD inhibitors, glufosinate, glyphosate

するなど複数の形質を導入したスタック品種がダイズやトウモロコシなどで開発されている。全米各地で行われている種子会社の新品種展示圃場を見る限り、ほとんどすべてがスタック品種となっている現状がある。しかもこうした形質の人為的導入は、品種作出の過程で遺伝子間での相互干渉の可能性もあり、非予測的な形質の発現が懸念されるなどの理由により、わが国では消費者への理解を得ることが一層困難になると考えられる。しかし、わが国は、アメリカに次いで世界で最も多くの119系統(品種)を、すでに遺伝子組換え作物を食用としてまたは栽培環境への影響評価を終えて承認している(表-5)。最初の除草剤1剤の耐性遺伝子組換え作物の場合には、時間をかけて審査が慎重に進められたのに対して、さまざまな形質が数種類導入されているスタック品種が、EUなどの諸外国に比べても、すさまじい速さで審査を終えており、審査制度に対する不安を感じる国民も多い。また、アメリカのダイズ、トウモロコシなどは主に日本向けの輸出が前提となって栽培されているため、農家向けの品種選定マニュアルには

日本の審査状況が示されており、アメリカの栽培農家にとっては日本での許認可の情報が品種選択の大きな要因となっている。

除草剤による雑草防除の課題

殺草スペクトラムの広い除草剤や複数の除草剤耐性GM作物の作出による雑草防除技術は、画期的な技術革新にはならず、単に化学除草剤による適用場面の拡大策にすぎないことが、アメリカやブラジルでのこれら事例により証明された。言い換えると、除草剤耐性GM作物の作出により、特定の除草剤に極端に依存する雑草防除は、その除草剤の商品寿命を短期化することになる。また、これから普及する複数の除草剤耐性遺伝子導入作物も、いずれこれら成分の交差抵抗性をもつバイオタイプが出現することになり、その除草剤の商品寿命を短期化することとなる。言い換えると、新規作用点をもつ化合物の開発が停滞する中で、既存剤の合理的使用により、出来るだけ長く使用できるような施策が低コストな農業生産として必要である。同時に、持続的に除草剤による防除を行うには、雑

表-5 日本で食用または栽培が承認されている遺伝子組換え作物の品種(系統)数(2011年現在)

作物	わが国で承認された系統数	食用で承認された系統数	栽培が承認された系統数	除草剤耐性系統数	stack系統数
トウモロコシ	50	45	38	46	36
ワタ	21	19	6	15	9
カノーラ(なたね)	14	14	13	14	7
バレイショ	10	10	0	0	7
ダイズ	7	7	6	6	1
アルファルファ	3	3	3	3	0
テンサイ	3	3	0	3	0
パパイヤ	1	1	0	0	0
トマト	1	1	0	0	0
カーネーション	5	0	5	5	5
イネ	2	0	2	0	0
バラ	2	0	2	0	0
合計	119	103	75	92	65

草の特性を考慮した新しい作用点を有し、殺草スペクトラムが異なる新規化合物の開発をつづけることがより重要であることを示唆している(佐合 2011)。

また、glyphosate剤が市場において高い占有率を示す背景にはglyphosate剤の低価格化があり、低価格化にはモンサント社の製造コスト低減の努力とともに、特許切れに伴うジェネリック(generic)品の存在がある。こうした低価格化が新規作用性をもつ除草剤開発を困難にしている。実際、除草剤の特許出願数も21世紀には減少してきており、特に欧米および日本メーカーの特許出願数が激減している。地球規模での食料生産の合理化に寄与する新剤の開発には、再生産可能な価格の形成や経済の戦略的仕組みが必要となる。さらに、除草剤耐性GM作物についてもこうした対策により、優れた除草剤をできるだけ長く利用するための工夫が必要である(佐合 2011)。

最後に、わが国においては不耕起栽培が普及

していないことや、除草剤抵抗性雑草対策が深刻な事態には至っていないなどの事情を勘案すると、必ずしも除草剤耐性GM作物を利用した雑草防除技術が必要であるとは言えない状況である。しかしながら、除草剤による防除が安全で持続的な技術として今後とも発展させるには、開発企業、使用農家が一体となった使用指針を作成し、使用者が遵守する方策を確立させる必要がある。すなわち、除草剤開発コストもつきつめると農家の負担となることを考えると、除草剤による雑草防除をできるだけ持続的に進めるようにするために、次のような使用者のための原則を設ける必要があると考えられる。1) 十分な効果を保証できる適正薬量散布の遵守、2) 1作期内の同一作用機作除草剤の使用回数制限、3) 1作期に複数回の除草剤を使用する場合には、作用機作の異なる除草剤との体系使用、4) 発生雑草が広範囲にわたる場合には、十分な効果を保証できる混合剤の開発・利用などである(佐合 2011)。

さらに、メジャークロップ（作物）に対する新除草剤の開発は企業によりつづけられているが、マイナークロップ（作物）に対しては、採算性の面から新除草剤の開発はされず、適用できる除草剤が少なく、防除困難な場面が多く報告されている。こうしたマイナークロップに適用性の広い除草剤の耐性遺伝子組み換えにより、真に農家の要望に応える技術開発になると考えられる。

引用文献

- Benbrook, Charles. 2009. Impacts of Genetically Engineered Crops on Pesticide Use in the United States-The First Thirteen Years. The Organic Center Critical Issue Report.
- Brookes, G. and P. Barfoot. 2012. GM crops: global socio-economic and environmental impacts 1996-2010. P.G. Economics Ltd. Dorchester, UK.
- Conservation Technology Information Center (CTIC) 2008. Crop Residue Management Survey Results
- Gianessi, L. 2008. Economic impacts of glyphosate-resistant crops. *Pest Management Science* 64(4).346-352
- Heap, Ian. 2010. International Survey of herbicide resistant weeds In HRAC <http://www.weed-science.org/In.asp>
- James, Clive. 2011. Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops. ISAAA Brief 43-2011.
- MONSANT 2012. Roundup Ready Soybean Recommendations and Incentives. ROUNDUP READY PLUS.
- Mueller, Thomas C., Paul D. Mitchell, Bryan G. Young and A. Stanley Culpepper. 2005. Proactive versus reactive management of glyphosate-resistant or tolerant weeds. *Weed Tech.* 19. 925-933.
- 日本学術会議 2010. 提言「わが国における遺伝子組換え植物研究とその実用化に関する現状と問題点」基礎生物委員会, 統合生物学委員会, 農学委員会合同植物科学分科会.
- Owen, M.D. 2009. Glyphosate resistance in the United States. *Weed Science Society of America 49th Meeting* 363.
- 佐合隆一 2011. 除草剤耐性遺伝子組換え作物による雑草防除の有効性: 米国を例として. *雑草研究* .56(2).104-110.
- USDA 2006. Agricultural Chemical Usage 2005. Field crops Summary 1-36.
- USDA 2007 Agricultural Chemical Usage 2006. Field crops Summary 1-38.
- USDA 2008b. Agricultural Chemical Usage 2007. Field crops Summary 1-28.
- USDA NASS 2012. Acreage (June 2012) National Agricultural Statistics Service (NASS), Agricultural Statics, Board, USDA
- Waltz Emily. 2010. Glyphosate resistance threatens Roundup hegemony. *NATURE BIOTECHNOLOGY* 28(6)537-538.
- Weed Resistance Management 2008. Practical Approaches to Managing Weeds. <http://www.Weedresistancemanagement.com/>
- Zulauf, C. and E. Hertzog. 2011. Biotechnology and US Crop Yields. <http://aede.osu.edu/biotechnology-and-us-crop-yield-trends>.