

要旨および結論

本研究は、遺伝子組換え（GM）作物の本格的な商業栽培が開始されてから 19 年の間に、これらの作物が世界の社会経済および環境にもたらした影響についての研究の成果を提示するものである。本研究は農家への経済的効果、生産面での効果、殺虫剤および除草剤の使用量の変化による環境への影響、ならびに温室効果ガスの排出削減に対する貢献に焦点をあてている。

農業所得面での効果³

遺伝子組換え技術は生産性向上と効率化の組み合わせによって、農業所得に対して顕著なプラスの影響を与えてきた（表 1）。2014 年の GM 作物による農業所得の増加は世界全体で 177 億ドルだった（直接効果）。これは主要 4 作物（ダイズ、トウモロコシ、ナタネおよびワタ）の世界生産金額を 7.2%増加させたことに等しい。1996 年以降、農業所得の増加は 1,503 億ドルに達している。

2014 年に農業所得の増加が最も大きかったのはトウモロコシ部門で、主として収量増によるものである。2014 年に GM 害虫抵抗性トウモロコシにより生み出された 53 億ドルという所得増は、GM 作物を生産する国におけるトウモロコシの生産額を 6.1%増加させたのに等しい。言い換えれば、この所得増は 2014 年に世界のトウモロコシ生産額 1,630 億ドルの 3.2%相当を増加させたのに等しい。1996 年からの累計では、GM 害虫抵抗性技術により、世界のトウモロコシ農家に 414 億ドルの所得増がもたらされている。

ワタ部門でも、収量増と生産コスト減の組み合わせにより大きな利益が生まれている。GM 作物を栽培する国々ではワタ農家の農業所得は 2014 年に 39 億 4,000 万ドル増加し、1996 年以降、ワタ部門は累計で 448 億ドルの利益を得てきた。2014 年に得られた所得の増加は、これらの国々におけるワタの生産額を 12.5%増加させた、あるいは、世界全体のワタ生産額 440 億ドルの 8.9%を増加させたことに等しい。これらの生産額増はワタに関する 2 つの新技术の大きな価値を物語っている。

ダイズおよびナタネの部門でも大幅な農業所得の増加がもたらされている。ダイズにおける GM 除草剤耐性技術は、2014 年に農業所得を 52 億ドル増加させ、1996 年以降累計で 466 億ドルの農業所得の増加を生み出してきた。また、南米で「インタクタ」ダイズ（除草剤耐性と害虫抵抗性の形質を組み合わせたもの）が採り入れられて 2 年目の 2014 年には 8 億 5,000 万ドルの農業所得の増加がもたらされ、2013 年と 2014 年の 2 年間で合わせて約 12 億ドルの農業所得の増加がもたらされたことになる。ナタネ部門（主に北米）では、累計で 48 億 6,000 万ドルの所得の増加がもたらされた（1996 年～2014 年）。

表 2 は、GM 作物を採用する主要な国々における農業所得の増加をまとめたものである。この表では、南米（アルゼンチン、ボリビア、ブラジル、パラグアイおよびウルグアイ）での GM 除草剤耐性ダイズ、中国およびインドでの GM 害虫抵抗性ワタ、米国でのさまざまな GM 栽培品種など、GM 作物の栽培がこれらの国々において農業所得の著しい増加をもたらしていることを如実に表している。同表はさらに、南アフリカ共和国、フィリピン、メキシコおよびコロンビアでも農業所得が増加していることを示している。

³ 詳細は第 3 章を参照。

GM 作物による農業所得向上を開発途上国全体と先進国全体で比較したものが表 3 である。この表から、2014 年の農業所得の増加の 46%を開発途上国の農家が得たことが分かる。こうした開発途上国の農家の所得向上の大部分は、GM 害虫抵抗性ワタおよび GM 除草剤耐性ダイズによるものである⁴。1996 年から 2014 年の 19 年間にもたらされた累計的な農業所得の増加の 50.6% (760 億 6,000 万ドル) を開発途上国の農家が得ている。

遺伝子組換え技術の利用に伴う農家のコストについて調べてみると、表 4 に示されている通り、2014 年においては、4 種類の主要な GM 作物全体での費用総額は、技術による全利益（この技術により創出された価値、すなわち農業所得の増加と種子のサプライチェーンに支払われる技術費⁵の総和）の 28%であった。

開発途上国では、農家の費用総額は技術による全利益の 23%に相当し、一方、先進国では 32%だった。状況は国によりさまざまだが、技術による全利益に対する農業所得の増加の割合が、先進国よりも開発途上国の方が高いことは、いくつかの要因を反映している。その要因とは、開発途上国では知的所有権に関する規定や法の施行が緩いこと、ならびに先進国の農家に比べて開発途上国の農家の方が 1 ヘクタール当たりの農業所得増加の平均水準が高いことなどである。

表 1：GM 作物の栽培による世界的な農業所得の増加（1996 年～2014 年）：百万米ドル

形質	農業所得の増加 (2014 年)	農業所得の増加 (1996 年～2014 年)	2014 年の農業所得 の増加 (GM 採用国 でのこれらの作物 の総生産額に対す る割合 (%) として)	2014 年の農業所得 の増加 (世界の作物 総生産額に対する 割合 (%) として)
GM 除草剤耐性ダイズ	5,221.4	46,643.4	4.6	4.2
GM の除草剤耐性・害虫 抵抗性ダイズ	853.5	1,174.7	0.75	0.69
GM 除草剤耐性トウモ ロコシ	1,600.1	9,050.4	1.8	1.0
GM 除草剤耐性ワタ	146.5	1,654.2	0.5	0.3
GM 除草剤耐性ナタネ	607.1	4,860.0	6.6	1.8
GM 害虫抵抗性トウモ ロコシ	5296.0	41,407.3	6.1	3.2
GM 害虫抵抗性ワタ	3,940.8	44,834.3	12.5	8.9
その他	79.7	652.4	適用せず	適用せず
合計	17,745.1	150,276.7	7.3	7.2

注：数値はすべて名目値。「その他」はウイルス抵抗性のパパイヤおよびスカッシュ、ならびに除草剤耐性のテンサイ。割合 (%) の合計には「その他の作物」は含まれない（すなわちダイズ、トウモロコシ、ナタネおよびワタの主要 4 作物の合計値）。農業所得の計算値は、収量、作物の品質ならびに生産の主要変動費（例えば種子の割増金の支払、作物保護費への影響）などの影響を算入した後の、農業所得の純変動額。

⁴ 開発途上国と先進国への所得増加の分配が、各国をそれぞれのカテゴリーにどのように分類するかによって影響を受けることを著者らは認めている。本論文で用いた定義は James (2014) が用いた定義に合わせている。

⁵ 技術費は、農家への種子販売者、種子メーカー、育種家、流通業者および遺伝子組換え技術の提供者を含む種子のサプライチェーンへ支払われるプレミアムを言う。

表 2 : 各国の GM 作物による農業所得の増加 (1996 年～2014 年) : 百万米ドル

	GM 除草 剤耐性 ダイズ	GM 除草 剤耐性 トウモロ コシ	GM 除草 剤耐性 ワタ	GM 除草 剤耐性 ナタネ	GM 害虫 抵抗性 トウモロ コシ	GM 害虫 抵抗性 ワタ	GM の除 草剤耐 性・害虫 抵抗性 ダイズ	合計
米国	21,400.3	6,106.1	1,074.1	311.4	32,198.3	4,750.2	該当なし	65,840.4
アルゼンチン	16,435.6	1,243.0	145.0	該当なし	678.3	803.0	33.5	19,338.4
ブラジル	6,317.2	1,368.3	133.3	該当なし	4,787.1	72.3	1,100	13,778.2
パラグアイ	1,029.2	0.9	該当なし	該当なし	13.1	該当なし	26.3	1069.5
カナダ	613.3	137.4	該当なし	4,492.8	1,229.5	該当なし	該当なし	6,473.0
南アフリカ 共和国	18.1	48.3	4.2	該当なし	1,711.9	30.9	該当なし	1,813.4
中国	該当なし	該当なし	該当なし	該当なし	該当なし	17,537.6	該当なし	17,537.6
インド	該当なし	該当なし	該当なし	該当なし	該当なし	18,268.4	該当なし	18,268.4
オーストラリア	該当なし	該当なし	91.5	55.8	該当なし	801.7	該当なし	949.0
メキシコ	6.1	該当なし	183.2	該当なし	該当なし	194.3	該当なし	383.6
フィリピン	該当なし	141.6	該当なし	該当なし	418.3	該当なし	該当なし	559.9
ルーマニア	44.6	該当なし	該当なし	該当なし	該当なし	該当なし	該当なし	44.6
ウルグアイ	143.2	1.2	該当なし	該当なし	24.8	該当なし	14.1	183.3
スペイン	該当なし	該当なし	該当なし	該当なし	231.7	該当なし	該当なし	231.7
その他の EU 加盟国	該当なし	該当なし	該当なし	該当なし	22.2	該当なし	該当なし	22.2
コロンビア	該当なし	3.8	23.0	該当なし	82.5	19.0	該当なし	128.3
ボリビア	636.0	該当なし	該当なし	該当なし	該当なし	該当なし	該当なし	636.0
ミャンマー	該当なし	該当なし	該当なし	該当なし	該当なし	185.0	該当なし	185.0
パキスタン	該当なし	該当なし	該当なし	該当なし	該当なし	1,954.0	該当なし	1,954.0
ブルキナファソ	該当なし	該当なし	該当なし	該当なし	該当なし	177.6	該当なし	177.6
ホンジュラス	該当なし	該当なし	該当なし	該当なし	9.6	該当なし	該当なし	9.6

注 : 数値はすべて名目値。農業所得の計算値は、収量、作物の品質ならびに生産の主要変動費（例えば種子の割増金の支払、作物保護費への影響）などの影響を算入した後の、農業所得の純変動額。米国の合計欄の数値には（表に記載されていない）その他の作物・形質についての 6 億 4,360 万ドルも含まれる。カナダの GM 除草剤耐性テンサイからの農業所得の追加額 860 万ドルも、この表に記載されていない。

表 3 : GM 作物による農業所得の増加 (2014 年) : 開発途上国および先進国 : 百万米ドル

	先進国	開発途上国
GM 除草剤耐性ダイズ	3,042.3	2,179.1
GM の除草剤耐性・害虫抵抗性ダイズ	0	853.5
GM 除草剤耐性トウモロコシ	1,110.9	489.2
GM 除草剤耐性ワタ	53.1	93.4
GM 除草剤耐性ナタネ	607.1	0
GM 害虫抵抗性トウモロコシ	4,245.0	1,051.0
GM 害虫抵抗性ワタ	447.3	3,493.5
GM ウイルス抵抗性のパパイヤおよびスカッシュ、ならびに GM 除草剤耐性テンサイ	79.7	0
合計	9,585.4	8,159.7

開発途上国とは、南米のすべての国、メキシコ、ホンジュラス、ブルキナファソ、インド、中国、パキスタン、ミャンマー、フィリピンおよび南アフリカ共和国を示す。

表 4 : 農業所得の増加と遺伝子組換え技術を利用するための費用の比較 (百万ドル) (2014 年)

	技術利用 費： 全農家	農業所得 の増加： 全農家	農家および 種子サプラ イチェーン が技術から 得る全利益	技術利用費： 開発途上国	農業所得の 増加： 開発途上国	農家および種子 サプライチェー ンが技術から得 る全利益： 開発途上国
GM 除草剤耐性 ダイズ	1,952.8	5,221.4	7,174.2	334.5	2,179.1	2,513.6
GM の除草剤耐 性・害虫抵抗性 ダイズ	341.7	853.5	1,195.2	341.7	853.5	1,195.2
GM 除草剤耐性 トウモロコシ	1,141.2	1,600.1	2,741.3	256.1	489.2	745.3
GM 除草剤耐性 ワタ	298.3	146.5	444.8	34.1	93.4	127.5
GM 除草剤耐性 ナタネ	133.6	607.1	740.7	該当なし	該当なし	該当なし
GM 害虫抵抗性 トウモロコシ	2,244.6	5,296.0	7,540.6	945.0	1,051.0	1,996.0
GM 害虫抵抗性 ワタ	678.0	3,940.8	4,618.8	471.2	3,493.5	3,964.7
その他	71.2	79.7	150.9	該当なし	該当なし	該当なし
合計	6,861.4	17,745.1	24,606.5	2,382.6	8,159.7	10,542.3

技術利用費は、遺伝子組み換え種子に対して農家が支払う従来種子の価格からの割増金（種子プレミアム）に基づく。

GM 技術の農業生産に対する影響

直接的な農業所得の増加を算出するために用いた収量増加効果（補足資料 Appendix2 を参照）に加え、南米で裏作物としてのダイズの作付が可能になったことを考慮に入れると、GM 作物は 1996 年以降、世界のトウモロコシ、ワタ、ナタネおよびダイズの生産量に大幅な増加をもたらしてきた（表 5）。

トウモロコシおよびワタで用いられている GM 害虫抵抗性形質は、トウモロコシの生産増の 95.3%、ワタの生産増の 99.3%を占めている。この技術を採用する国々ではいずれも、収量にプラスの影響が生じている（ただしオーストラリアの GM 害虫抵抗性ワタを除く。同国ではそれ以前に行われていた殺虫剤使用の徹底による *Heliothis sp*（オオタバコガの幼虫などの害虫）の駆除レベルが非常に良好だった）。オーストラリアでこの技術が採用された主な理由とその利点は、従来技術（殺虫剤の散布および種子処理など）による平均収量と比較した場合の、殺虫剤の使用量削減による大幅な経費節減と環境面での利益である。1996 年以降、19 年間で、GM 害虫抵抗性形質トウモロコシおよびワタの全作付面積における収量の平均増加率は、トウモロコシで 11.7%、ワタで 17%であった。

GM 除草剤耐性技術の主たる効果は、雑草防除の費用対効果を向上させ（除草コストを削減し）、より簡便な雑草防除を可能にしたことである。GM 技術による雑草防除法の改良により収量が向上した国も見受けられるが、除草剤耐性作物による農業生産量の増大は、主として不耕起農法の拡大によるものであった。不耕起農法を採用した南米の国では、コムギの収穫後直ちにダイズの播種が可能となり生産のサイクルが短縮された。コムギ収穫後に裏作物として作付されるダイズにより、アルゼンチンおよびパラグアイでは 1996 年から 2014 年の間にダイズの生産量が 1 億 3,570 万トン増加した（これは GM 除草剤耐品種によるダイズ生産の増加量全体の 85.7%に相当する）。「インタクタ」ダイズによりダイズ生産量は世界全体でさらに 256 万トン増加した。

表 5：GM 作物の収量向上による生産量の増加

	1996 年から 2014 年までの生産量の増加 (百万トン)	2014 年の生産量の増加 (百万トン)
ダイズ	158.4	20.25
トウモロコシ	321.8	50.10
ワタ	24.7	2.90
ナタネ	9.2	1.17
テンサイ	0.9	0.15

注：テンサイは米国およびカナダのみ（2008 年以降）

殺虫剤および除草剤の使用量の変化による環境への影響⁶

この影響を調べるために、本研究では殺虫剤と除草剤の有効成分の使用量を分析し、さらに、環境影響指数（EIQ）と呼ばれる指標を用いて環境、動物、そして人の健康に対する広範な影響を評価した。EIQ は、個々の農薬が、遺伝子組換え技術あるいは従来技術による種々の生産システムにおいて、環境や健康に与えるさまざまな影響を単一の「農地 1 ヘクタール当たりの指数」で表すもので、個々の製品に関連する主要な毒性および環境暴露データを用いて計算している。したがって EIQ は、さまざまな農薬の環境および人の健康への影響を対比・比較するうえで、有効成

⁶ 4.1 項を参照。

分の重量のみの場合よりも優れた指標となる。ただし読者は、EIQ が（主として毒性に関する）一定の目安であり、すべての環境問題および環境影響を考慮に入れるものではない点に留意する必要がある。GM 除草剤耐性作物による生産性を分析するに当たり、従来の除草方法でも同じレベルの除草効果が得られるものと仮定した。

遺伝子組換えの形質は、GM 作物の栽培地で殺虫剤および除草剤の使用に伴う環境影響の大幅な軽減に貢献してきた（表 6）。1996 年以降、GM 作物栽培での農薬の利用は有効成分量で 5 億 8,140 万 kg 減少している（8.2%の減少）。また EIQ 指数により表される、これらの作物に対する除草剤および殺虫剤の使用に伴う環境影響は、18.5%軽減している。

絶対値で見れば、環境面に対するプラス効果は、GM 害虫抵抗性技術の使用に伴うものが最も大きい。ワタの栽培には従来、殺虫剤が多く使用されていたが、GM 害虫抵抗性ワタは、殺虫剤使用の大幅な削減を促したことにより、有効成分量で 43%の減少（2 億 4,910 万 kg の減少、この量は、遺伝子組み換えによる害虫抵抗性ワタの栽培区域で使用された全殺虫剤量の 27.9%に相当）、EIQ 指数では 36%の低減に貢献してきた（1996 年～2014 年）。同様にトウモロコシでの GM 害虫抵抗性技術の利用は、殺虫剤使用の大幅な減少につながっており（有効成分 7,970 万 kg）、これには環境面での便益も伴っている。

GM トウモロコシに対する除草剤使用量も 2 億 1,370 万 kg、8.4%の減少を示している（1996 年～2014 年）。一方で、こうした作物での除草剤使用に伴う総合的な環境への影響はマイナス 12.6%と、これよりも大きく低減している。これは多くの GM 除草剤耐性作物に用いられる除草剤の有効成分が環境への負荷が少ない特性を持つためである。

ダイズおよびナタネの栽培でも大きな環境に対するプラス効果が生じている。ダイズの栽培においては除草剤の使用量が 550 万 kg 増加してはいるものの（1996 年～2014 年）、環境への負荷が少ない除草剤への変更により、環境への影響は 14.1%低減（改善）している。ナタネ栽培においては、除草剤使用量が 2,180 万 kg 削減されており（17.2%減）、除草剤使用に伴う環境影響は（環境に低負荷の除草剤への変更により）29.3%低減している。

殺虫剤および除草剤の使用量削減に伴う環境面での便益を、開発途上国と先進国で比較すると（表 7）、先進国と開発途上国の間で 53%：47%の割合で分配されていることが示されている（1996 年～2014 年）。開発途上国の環境面での便益の 70%は、GM 害虫抵抗性ワタの使用によるものである。

表 6:世界の GM 作物栽培における除草剤および殺虫剤の使用量の変化による影響(1996 年～2014 年)

形質	有効成分使用量 の変化 (百万 kg)	フィールド EIQ 指数の変化 (百 万フィールド EIQ/ha 単位で 表したもの)	GM 作物に対す る有効成分使用 量の変化率 (%)	GM 作物に対す る除草剤および 殺虫剤の使用に 伴う環境影響の 変化率 (%)	GM 形質の栽培 面積 (2014 年) (百万 ha)
GM 除草剤耐性 ダイズ	+5.5	-7,623	+0.2	-14.1	81.8
GM 除草剤耐 性・害虫抵抗性 ダイズ	-1.5	-143	-0.9	-2.7	9.5
GM 除草剤耐性 トウモロコシ	-213.7	-6,811	-8.4	-12.6	46.2
GM 除草剤耐性 ナタネ	-21.8	-763	-17.2	-29.3	8.9
GM 除草剤耐性 ワタ	-23.1	-585	-7.3	-9.9	4.6
GM 害虫抵抗性 トウモロコシ	-79.7	-3,522	-51.6	-55.7	48.3
GM 害虫抵抗性 ワタ	-249.1	-11,122	-27.9	-30.4	23.4
GM 除草剤耐性 テンサイ	+2.0	変化なし	+32.5	変化なし	0.47
合計	-581.4	-30,570	-8.2	-18.5	

表 7:GM 作物栽培に伴う殺虫剤および除草剤の使用量低減効果の環境面での便益(1996 年～2014 年) :
開発途上国および先進国

	フィールド EIQ 指数の変化 (百万フィールド EIQ/ha 単位 で表したもの) : 先進国	フィールド EIQ 指数の変化 (百万フィールド EIQ/ha 単位 で表したもの) : 開発途上国
GM 除草剤耐性ダイズ	-5,298.4	-2,325.1
GM 除草剤耐性・害虫抵抗性ダイズ	0	-143.6
GM 除草剤耐性トウモロコシ	-6,084.3	-726.8
GM 除草剤耐性ワタ	-472.1	-113.0
GM 除草剤耐性ナタネ	-763.0	0
GM 害虫抵抗性トウモロコシ	-2,543.0	-978.9
GM 害虫抵抗性ワタ	-930.8	-10,191.5
GM 除草剤耐性テンサイ	0	0
合計	-16,091.6	-14,478.9

ただし、GM 除草剤耐性作物が広く栽培されている地域の一部では、雑草を管理するためグリホサートなどの単一の除草剤を連用する農家もあり、抵抗性雑草が出現する一因となってきたことに留意する必要がある。現在、世界で 35 種の雑草がグリホサートに対して抵抗性を示すことが確認されており、その中にはグリホサート耐性作物栽培地以外で発見されたものもある

(www.weedscience.org)。例えば米国では現在、15 種の雑草がグリホサートに対して抵抗性を示すことが確認されており、このうち 2 種はグリホサート耐性作物栽培と無関係である。米国では

現在、GM 除草剤耐性技術が使用されているトウモロコシ、ワタ、ナタネ、ダイズおよびテンサイが栽培されている農地の 30%から 50%で抵抗性雑草が出現している。

近年、雑草学者の間で、これらの雑草がグリホサートに対する抵抗性を発達させたことにより、GM 除草剤耐性作物の雑草管理プログラムを変更する必要があるという統一見解が形成されつつある。GM 除草剤耐性作物の栽培者は、雑草にグリホサート抵抗性が見られない場合であっても、事前対策を強化し、総合的雑草管理システムの中にグリホサートとの組み合わせで他の除草剤（作用機作が異なり補完的であるもの）も使用するよう助言されることが多くなっている。

一種類の除草剤に頼らない予防的な手法を使った雑草管理が、GM 除草剤耐性作物の栽培において除草剤抵抗性を持つ雑草の出現を防ぐ上で最も重要な戦略である。これは従来型の作物の栽培において雑草の抵抗性の発達を防ぐのと同じ方法でもある。予防的な雑草管理計画は一般的に、除草剤の使用量も少なく、環境面での特性も優れており、事後対応的な雑草管理計画よりも経済的でもある。

マクロレベルでは、GM 除草剤耐性作物に対し、事後対応および予防の両面からの雑草管理計画が採用されることにより、過去 7 年から 10 年の間に、GM 除草剤耐性ダイズ、ワタ、トウモロコシおよびナタネに散布される除草剤の種類、総使用量および環境特性が変化してきた。この点は本論文のデータにも示されている。

温室効果ガス排出に対する影響⁷

主に以下の 2 つの点から GM 作物が温室効果ガス排出量の低減に貢献している。

- 除草剤または殺虫剤の散布回数の減少、ならびに耕起に要するエネルギーの減少による、燃料使用量の削減。（従来の作物に比べて）農薬散布回数の減少に伴う燃料の節減、ならびに保全耕起、減耕起および不耕起農法への転換により、二酸化炭素排出量は恒久的に低減した。2014 年にはこの低減量が約 23 億 9,600 万 kg に達した（燃料使用量 8 億 9,800 万リットルの削減による）。1996 年から 2014 年までの間に恒久的に削減された燃料使用量は、累積で二酸化炭素 216 億 8,900 万 kg 相当と推定される（81 億 2,400 万リットルの燃料使用量の削減による）。
- 「不耕起」および「減耕起」⁸農法の採用。これらの農法は GM 除草剤耐性作物の採用とともに著しく普及してきた。なぜなら、GM 除草剤耐性技術により、農家の雑草防除能力が向上し、高い雑草防除レベルを得るために行っていた土壌耕起および苗床の必要性が低減しているからである。結果として耕起に用いるトラクターの燃料使用量が減り、土壌の質が向上し、土壌浸食の度合いが低くなる。そして、土壌中に留まる炭素量が増えることで温室効果ガス排出量の低減につながる。不耕起・減耕起農法が北米および南米で急速に普及したことで、2014 年には追加的に 54 億 4,900 万 kg の土壌炭素隔離の増加がみられたと推定される（大気への二酸化炭素排出を 199 億 9,800 万 kg 防いだことに相当する）。土壌の質が毎年改善されることから、土壌に隔離される炭素量は毎年累積的に増加する可能性がある。しかし、同様に、不耕起および減耕起農法が継続されるのは栽培区域の一部に過ぎないと考えられることから、複数年にわたる土壌炭素隔離の累積的な増加量が、各年の推定増加量の合計値と一致

⁷ 4.2 項を参照。

⁸ 不耕起農法とは土壌を一切耕さないことを意味し、一方、減耕起とは従来の耕起法に比べると土壌をかき回す度合いが少ないことを意味する。例えば不耕起農法ではダイズの種子はトウモロコシ、ワタまたはコムギなど前回の作物から残る有機物を利用して植え付けされる。

しない可能性もある。しかしながら、データが不足していることにより、従来型の耕起方法に戻ることを考慮に入れた累積的な土壌炭素隔離の増加量を、的確に推定することは不可能である。したがって、1996 年から 2014 年までに削減されたと推定される二酸化炭素排出量の累積値 1,869 億 4,500 万 kg という数字は注意を持って取り扱う必要がある。

こうした土壌炭素隔離による便益を自動車の炭素排出量に置き換えてみると（表 8）、以下のことが示されている。

- 2014 年に燃料使用量削減により恒久的に低減された二酸化炭素排出量は、自動車 107 万台分の炭素排出量に相当する。
- 2014 年の土壌炭素隔離の前年比推定増加量は、自動車 889 万台分の炭素排出量に相当する。
- 2014 年の GM 作物に関連する二酸化炭素排出量の低減は、燃料使用量の削減と土壌炭素隔離の増分を合わせて、自動車 995 万台分の炭素排出量に等しい。これは英国の自動車の全登録台数の 34%に相当する。
- 1996 年以降の土壌炭素隔離の推定増加量を、的確に推定することは不可能である。仮に、過去 20 年間に減耕起または不耕起農法で栽培された GM 除草剤耐性作物すべてが、継続して減耕起・不耕起農法で栽培されていたとすると、これによる二酸化炭素排出量の低減は 1,869 億 4,500 万 kg になる。これは自動車 8,300 万台の炭素排出量に等しい。しかしこれは計算上の最大値であり、実際の二酸化炭素の削減量はこれより低い可能性が高い。

表 8：炭素隔離に対する影響の状況（2014 年）：自動車換算値

作物／形質／国	燃料使用量の削減による恒久的な二酸化炭素の低減（二酸化炭素百万 kg）	燃料使用量の削減による恒久的な二酸化炭素の低減（自動車換算・千台×1 年間）	土壌炭素隔離の増加量（二酸化炭素百万 kg）	土壌炭素隔離の増加量（自動車換算・千台×1 年間）
GM 除草剤耐性ダイズ				
アルゼンチン	754	335	7,643	3,397
ブラジル	481	214	4,877	2,168
ボリビア、パラグアイ、ウルグアイ	180	80	1,828	812
米国	366	163	1,860	827
カナダ	48	21	253	112
GM 除草剤耐性トウモロコシ				
米国	173	77	2,492	1,107
カナダ	18	8	50	22
GM 除草剤耐性ナタネ				
カナダ	197	88	995	442
GM 害虫抵抗性トウモロコシ				
ブラジル	80	36	0	0
米国、カナダ、南アフリカ、スペイン	12	5	0	0
GM 害虫抵抗性ワタ				
世界	37	17	0	0
GM 害虫抵抗性ダイズ				
南米	50	22	0	0
合計	2,396	1,066	19,998	8,887

注：

1. 仮定：平均的な自家用車は 1 km 当たり 150 g の二酸化炭素を排出する。1 台の自動車は年間平均 1 万 5,000 km 走行し、よって年間に 2,250 kg の二酸化炭素を排出する。
2. GM 害虫抵抗性ダイズに関する二酸化炭素の低減は、殺虫剤使用の削減によるもの。「インタクタ」ダイズの除草剤耐性形質に関する低減はすべて GM 除草剤耐性ダイズの数値に含まれる。

結論

バイオテクノロジーは今日までに、農家が直面する様々な生産上の制約を克服する作物形質を生み出してきた。その結果、2014 年にはこの技術は 1 億 7,550 万ヘクタールの農地で採用され 1,800 万人の農家の生産性と収益性向上に貢献した。

過去 19 年の間に、この技術は社会経済および環境に対し重要な貢献をもたらしてきた。これまでに商業化された GM 作物の種類は少なく、またその形質も限られたものであるにもかかわらず、こうした成果が得られてきた。

作物バイオテクノロジーは、技術革新の直接的な効果および低コストで環境負荷の少ない農法を可能とすることで、経済面および環境面の利益をもたらしてきた。具体的には以下のとおりである。

- GM 害虫抵抗性形質からの利益の大半が技術の直接効果によるものである（収量の増加、生産上のリスク削減、および殺虫剤の使用量の減少）。したがって農家（主に開発途上国の農家）は、生産性と経済性の両方を向上することができるようになった。加えて、この農法は環境負荷の少ないものである。
- GM 除草剤耐性形質からの利益は、直接効果（主として農家の生産コスト削減）と農業システムの改善の組み合わせによるものである。（特にダイズにおける）GM 除草剤耐性技術は、農家が安価で広範な雑草に効果のある除草剤（グリホサート）を有効に活用することを可能としてきた。その結果として、北米および南米で従来型の生産システムから、減耕起・不耕起農法を利用した生産システムへの転換を可能にした。この生産システムの転換は、農家および広い範囲の生産者・消費者に、プラスの経済効果をもたらし、特に温室効果ガス排出量の削減において環境面で重要な貢献をしてきた（トラクターの燃料使用量の削減および土壌炭素隔離の増加によるものである）。
- 害虫抵抗性形質および除草剤耐性形質はともに、世界のダイズ、トウモロコシ、ワタおよびナタネの生産量を向上させるという重要な貢献をしてきた。

除草剤耐性作物については、一部の農家がグリホサートを連用し、作物の輪作および除草剤のローテーション使用を実施しなかったために、雑草の抵抗性が発達している地域もある。この問題に対処し、雑草防除レベルを維持するために、複数の除草剤を組み合わせ、別の除草剤耐性作物も採り入れた（すなわちグリホサートだけに頼るのではなく、グリホサートとともにその他の除草剤も使用する、またはグルホシネートなどの別の除草剤に耐性のある作物を用いる）、事後対応的な雑草管理計画と予防的な雑草管理計画を組み合わせる農家が増えてきた。これにより GM 除草剤耐性作物の生産費用は数年前に比べて高くなったが、従来型の生産システムに比べれば、GM 除草剤耐性技術は 2014 年も引き続き明らかに経済的に優位である。

本論文では、作物バイオテクノロジーがもたらす経済および環境へのプラスの効果を定量化する多数の証拠を集録した。これらの証拠は査読付き論文においても掲載されているものである。したがって本論文での分析は、世界中の多くの農家がなぜこの技術を採用し使用し続けるのか、その理由についての洞察をもたらす。読者には引用論文ならびにこの研究テーマについて書かれたその他の多くの文献（参考文献欄を参照）を読み、自分なりの結論を出すようお勧めする。

（2016 年 7 月 バイテク情報普及会 訳）