

要旨および結論

本報告は、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 25 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結果をまとめたものである。本報告で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

GM 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（図 1 および図 2）。2020 年の GM 作物による農業所得の増加は世界全体で 188 億ドルであった（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 5.9%増加させたことに等しい。1996 年以降、農業所得の増加は 2,613 億ドルに達している。

2020 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。2020 年に GM 害虫抵抗性トウモロコシにより生み出された 37 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 6.3%増加させたのに等しい。言い換えれば、この所得増は 2020 年に世界のトウモロコシ生産額 1,330 億ドルの 2.8%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 678 億ドルの所得増がもたらされている。

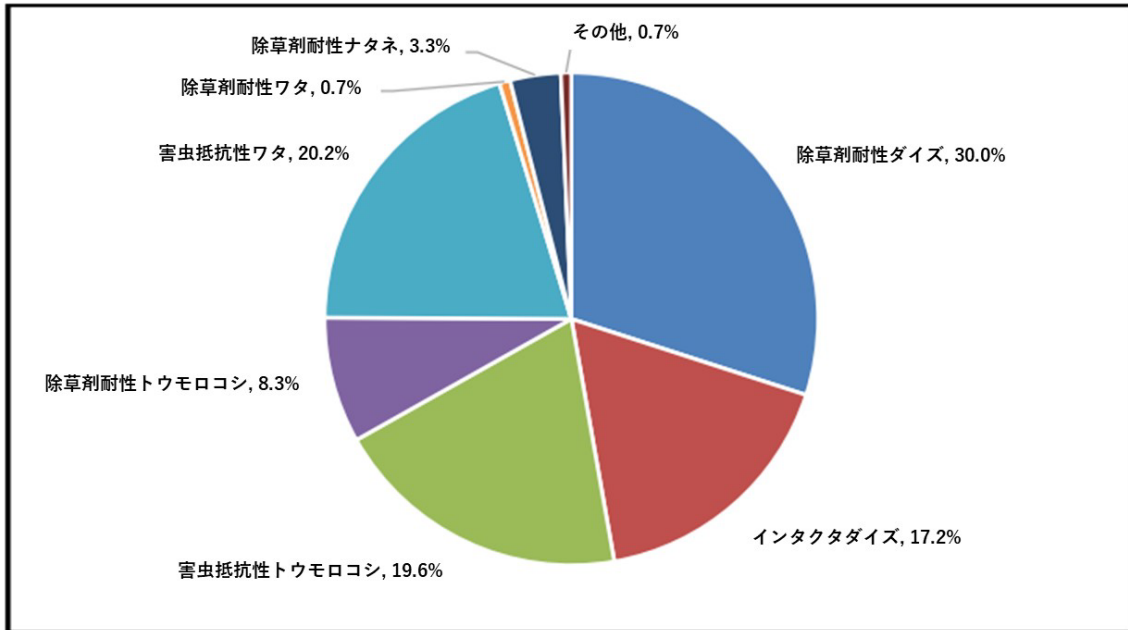
ワタ部門でも、収量増と生産コスト減の組み合わせにより大きな利益が生まれている。GM 作物を栽培する国々ではワタ農家の農業所得は 2020 年に 39 億 4,000 万ドル増加し、1996 年以降、ワタ部門は累計で 731 億 1,000 万ドルの利益を得てきた。2020 年に得られた所得の増加は、これらの国々におけるワタの生産額を 12.1%増加させた、あるいは、世界全体のワタ生産額 327 億ドルの 12%を増加させたことに等しい。これらの生産額増はワタ種子技術の 2 つのカテゴリーにおける大きな価値を物語っている。

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、2020 年に農業所得を 56 億 4,000 万ドル増加させ、1996 年以降累計で 746 億 5,000 万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 2013 年に採り入れられてから累計 160 億ドルの農業所得の増加がもたらされた。ナタネ部門（主に北米）では、

³ 詳細は第 3 章を参照。

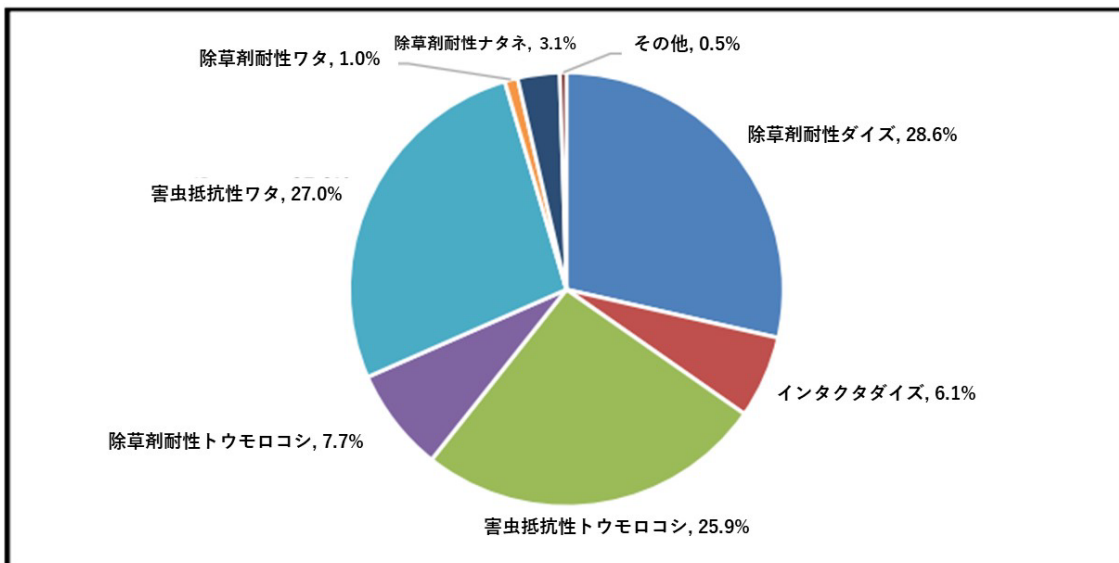
累計で 82 億ドルの所得の増加がもたらされた (1996 年～2020 年)。

図 1：世界的な GM 作物の農業所得の増加 (2020 年): 基準値合計 188 億ドル



注: その他 = 除草剤耐性テンサイ、ウイルス抵抗性パパイヤおよびスクワッシュ、乾燥耐性トウモロコシおよび害虫抵抗性ナス

図 2：世界的な GM 作物の農業所得の累計増加 (1996 年～2020 年): 基準値合計 2,613 億ドル



注: その他 = 除草剤耐性テンサイ、ウイルス抵抗性パパイヤおよびスクワッシュ、乾燥耐性トウモロコシおよび害虫抵抗性ナス

図 3 および図 4 は、GM 作物を栽培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。これらの図では、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 作物の栽培など、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。特に図 4（「その他の国々」のシェアの増加）は、パキスタン、フィリピンおよびコロンビアといった GM 作物技術を遅れて導入した国々でも農業所得が増加していることを示している。

図 3：国別の GM 作物の農業所得増加の累計（1996 年～2020 年）：基準値合計 2,613 億ドル

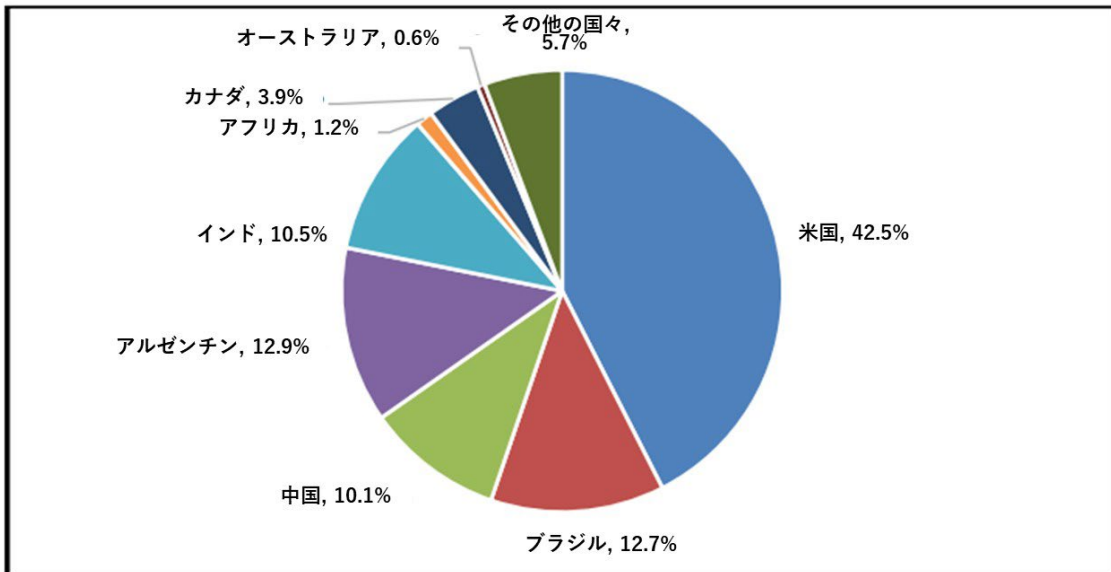
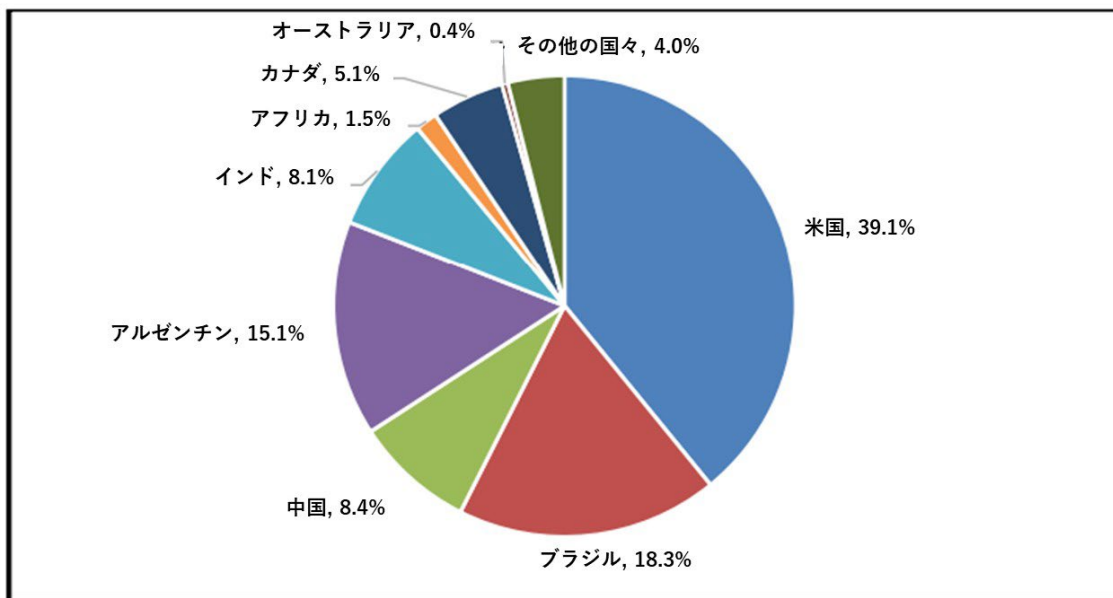


図 4：国別の GM 作物の農業所得増加（2020 年）：基準値合計 188 億ドル



GM 作物による農業所得増加を開発途上国全体と先進国全体で比較したところ、2020 年の農業所得増加の 55%を開発途上国の農家が得ていた。こうした開発途上国の農家の所得増加の大部分は、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 2020 年の 25 年間にもたらされた累計的な農業所得の増加の 52% (1,366 億ドル) を開発途上国の農家が得ている。

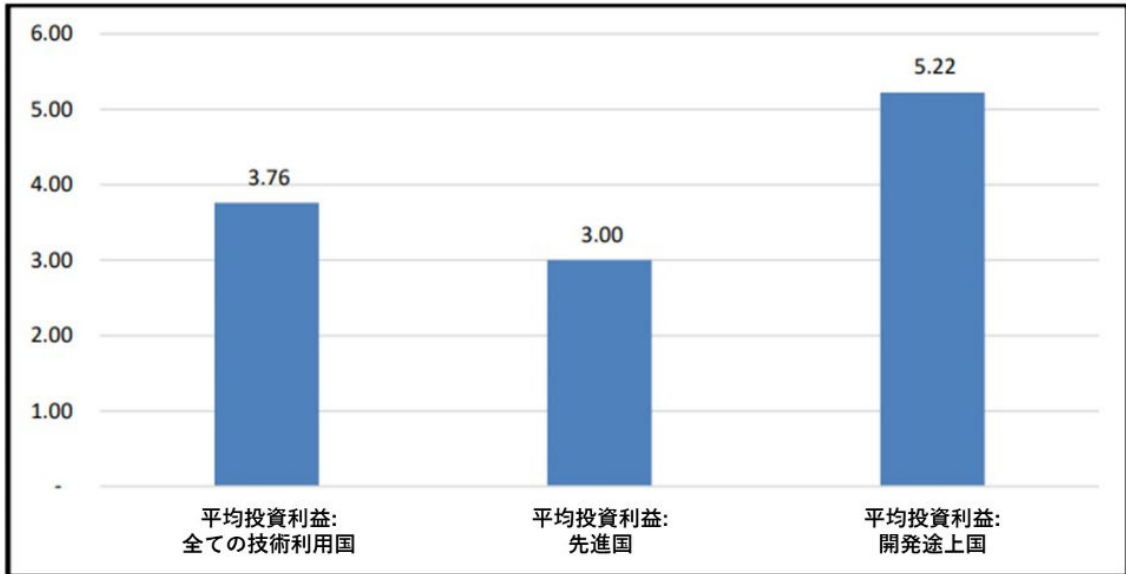
GM 技術の利用に伴う農家のコストについて調べてみると、平均コスト(1996 年~2020 年) は技術による全利益(この技術により創出された価値、すなわち農業所得の増加と種子のサプライチェーンに支払われる技術費⁵の総和)の 27%であった。投資の面では、(非組換え種子に対する費用と比較して) GM 種子に対する投資額が 1 ドル上がるごとに農業生産者は平均 3.76 ドルを得ていることになる。開発途上国では、GM 種子に対する投資額 1 ドル当たりの平均利益が 5.22 ドルであるのに対し、先進国では平均利益は 3.00 ドルであった(図 5)。

開発途上国では、農家の費用総額は技術による全利益の 19%に相当し、一方、先進国では 33%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。

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 年)が用いた定義と一致する。

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 GM 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いう。

図 5:1996~2020 年の GM 形質を有する種子への投資額 1 ドル当たりの平均投資利益 (ドル/ha)



過去 25 年間における総利益の 72%は高収量と裏作物としてのダイズ栽培による収益によりもたらされ、28%は低コスト（主に害虫および雑草管理費用の削減による）によりもたらされている。第二世代の GM 作物の栽培が増加するに伴い、経費削減と比較した際の収量/生産による収益のバランスが、変化してきている。よって、2020 年の総利益の内訳は、収量/生産による収益が 91%、経費削減が 9%であった。

GM 技術の農業生産に対する影響

上述した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 1）。

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 91.1%、ワタの生産増の 98.2%を占めている。この技術を採用する国々では、以前から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であったオーストラリアの GM 害虫抵抗性ワタを除き、いずれも収量にプラスの影響が生じている。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、25 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 17.7%、ワタで 14.5%であった。

前述したように、GM 除草剤耐性技術の主たる効果は、収量増とは対照的に、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。それにもかかわらず、改善された雑草防除により、国によっては高い収量がもたらされている。この技術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。従来のダイズ生産に加え、裏作物として作付されるダイズによって、1996 年から 2020 年までの間に世界のダイズ生産は 2 億 2,270 万トン増加し、2013 年以降は「インタクタ」ダイズによりさらに 4,440 万トン増加した。残りの GM に関連したダイズ生産は、2008 年以降北米諸国で栽培されている第二世代 GM 除草剤耐性ダイズによるもので、GM 除草剤耐性技術により、農家は雑草防除レベルが向上したことでより高い収量を得ることができるようになった。

表 1. GM 作物の収量向上による生産量の増加（百万トン）

	1996～2020年	2020年
ダイズ	330.35	33.48
トウモロコシ	594.58	47.9
ワタ	37.01	2.26
ナタネ	15.77	1.00
テンサイ	1.87	0.15

注：テンサイは米国およびカナダのみ（2008 年以降）

また、GM 作物技術の普及は、農家が今ある農業用地でより多く栽培できるようにし、新たな土地が耕作地に取り込まれるのを減らすことで、農業の占有面積の変化にも貢献している。例えば、GM 種子技術が広く使われている 4 つの主要作物の世界生産量を GM 技術を使わずに 2020 年の水準に維持しようとした場合、ダイズを 1,160 万 ha、トウモロコシを 850 万 ha、ワタを 280 万 ha、ナタネを 50 万 ha 追加で栽培しなければならず、この面積（合計 2,340 万 ha）はフィリピンとベトナムの農業面積を合わせたものに等しくなる。これは、ランド・シェアリング（土地の共有）とランド・スペアリング（土地の節約）のアプローチによく合致しており、科学と証拠（例えば Balmford, 2021 を参照）が示す、より持続可能な世界農業を実現する最善の方法である。

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、そしてヒト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、GM 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ヒトの健康への影響を対比・比較するうえで、有効成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。

GM 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 (図 6 および図 7)。1996 年以降、GM 作物栽培での農薬の利用は有効成分量で 7 億 4,860 万 kg 減少している (7.2%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、17.3%軽減している。

このうち最も大きな割合を占めたのは GM 害虫抵抗性ワタ (45%) で、次いで GM 除草剤耐性トウモロコシ (30%) となった (図 6)。EIQ 指標で測定したこれらの作物の除草剤および殺虫剤使用に伴う環境影響については 17.3%改善し、最大の割合を占めるのが GM 害虫抵抗性ワタ (全体の約 40%) で、GM 除草剤耐性ダイズ (26%) がそれに続く。

国別では、米国の農家が環境面で最大の効果を上げており、農薬有効成分の使用量を 3 億 2,200 万 kg 削減 (全体の 43%) した。これは、米国の農家が GM 作物技術を最初に広く取り入れ、長年にわたり米国の 4 作物すべてにおいて GM 作物の導入率が 80%を超えていること、また、これまで雑草や害虫の防除には殺虫剤・除草剤の使用が主な方法であったことを考えれば、驚くべきことではないだろう。中国とインドでも、GM 害虫抵抗性ワタの採用により、殺虫剤の有効成分使用量を 3 億 400 万 kg 以上削減 (1996~2020 年) するなど、重要な環境面での効果が生じている。

⁶ 4.1 項を参照。

図 6：有効成分総使用量（削減量）の形質別シェア 1996～2020 年（基準値合計：7 億 4,860 万 kg）

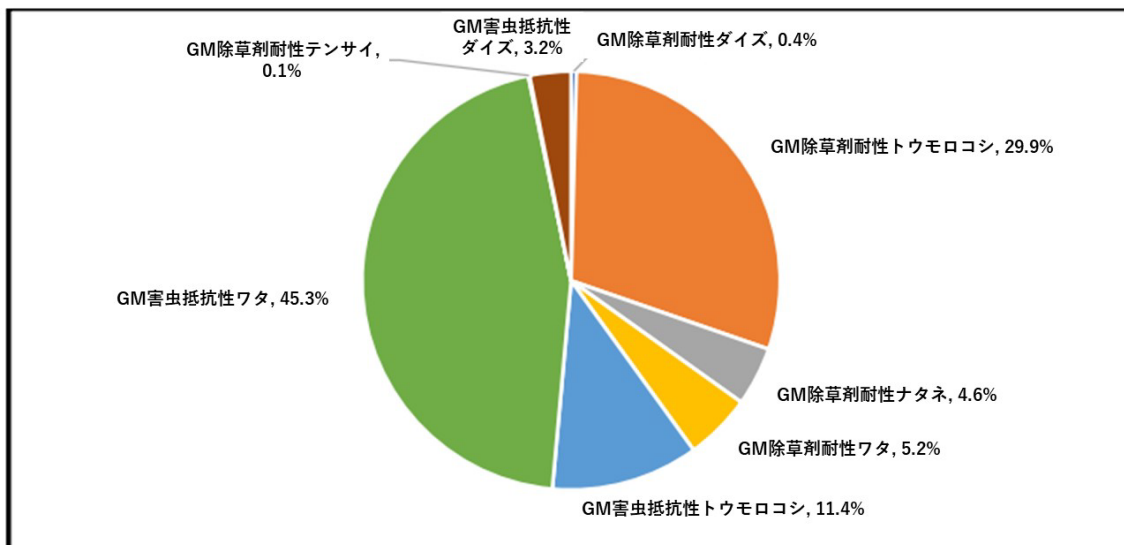
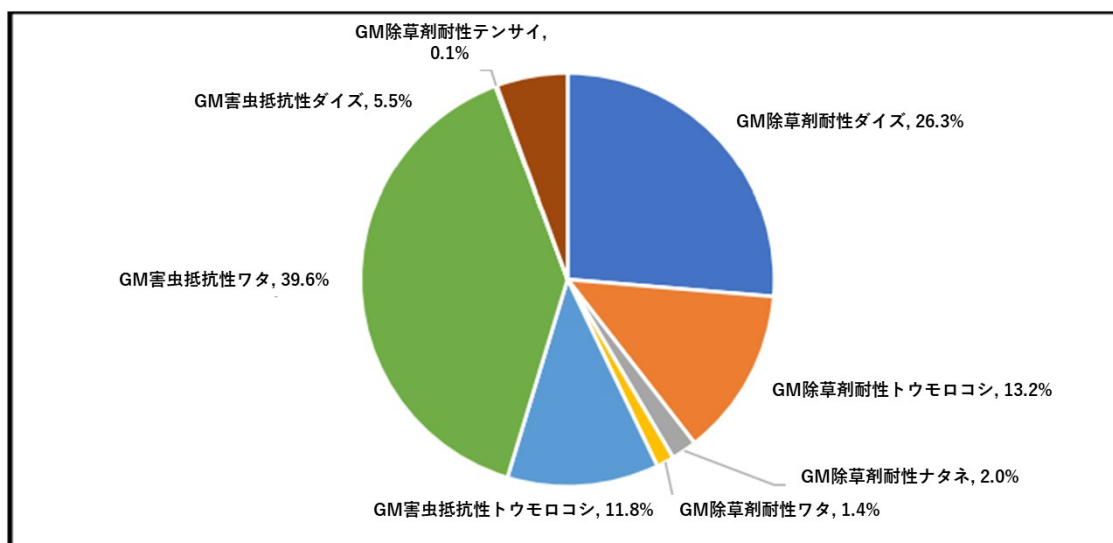


図 7：EIQ の変化（改善）総計の形質別シェア 1996～2020 年



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除草剤グリホサート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 56 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、17 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 60%から 80%で抵抗性雑草が出現している。

GM 除草剤耐性作物の栽培で農家がグリホサート抵抗性の雑草の存在に直面した場合には、グリホサートと組み合わせて他の除草剤（作用機序が異なり相補的なもの）を使用することが望ましく、場合によっては総合的な雑草管理体系の中で耕起を行うなどの栽培実施法を採用することが望ましい。このような雑草管理方法の変更は、上述の除草剤使用パターンの変化から明らかであり、どのような形態の雑草管理が実施されているかにかかわらず雑草が抵抗性を獲得する可能性を最小限に抑え、そのスピードを遅らせるために、すべての形の作付体系（GM 除草剤耐性だけではない）において、より総合的な雑草管理戦略を開発するという、より広範な課題を反映している。さらに、2016 年からは他の除草剤に対して耐性をもつ GM 除草剤耐性作物（しばしばグリホサートと組み合わせられる）が利用できるようになってきている国もある。マクロレベルでは、このような変更はこの 15 年間に GM 除草剤耐性作物に使用された除草剤の配合、総量、費用および全体的なプロファイルに影響している。

従来作物との比較では、GM 除草剤耐性作物を使用した際の環境プロファイルは、それでも重要な利点を提供し続けており、ほとんどの場合、従来作物と比較して環境プロファイルが改善されている（EIQ 指標で測定）。

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。

a) 燃料使用量の削減

トウモロコシ、ワタ、ダイズにおける GM 害虫抵抗性作物技術の使用により殺虫剤散布の回数が減ること、および GM 除草剤耐性作物により慣行耕起(CT)から減・不耕起(RT/NT⁸)システムへ切り替わることで燃料を節減し、二酸化炭素排出量を恒久的に削減することができた。1996 年から 2020 年までの期間に、146 億 6,200 万リットルの燃料使用量の削減によって、累積で約 391 億 4,700 万 kg の二酸化炭素が削減された。これは、自動車換算で、2,590 万台分の 1 年間の二酸化炭素排出量と同じである（表 2）。

燃料使用に関連する二酸化炭素排出量の削減で最も大きいのは、GM 除草剤耐性技術の採用と、それが土壌耕起を減らした RT/NT 生産システムへの転換を促進したことによる。こ

⁷ 4.2 項を参照。

⁸ 不耕起農法とは作付時にほとんど土壌をかき回さない（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。詳細な定義は 4.2.2 項に記載されている。

これは 1996～2020 年の期間に節減された燃料と二酸化炭素の 92%を占め、その中でも GM 除草剤耐性ダイズが最も大きく貢献している（総節減量の 68%）。これらの節減は、南米で最も大きくなっている。

2020 年には、9 億 4,800 万リットルの燃料使用量の削減により、燃料関連の節減は二酸化炭素 23 億 3,000 万 kg になった。この節減量は、自動車 168 万台分の 1 年間の二酸化炭素排出量に相当する。

表 2 GM 作物による燃料使用量削減による炭素固定・隔離量 1996～2020 年

作物／形質／国	燃料節減 (百万リットル)	燃料使用量の削減に よる恒久的な二酸化 炭素の節減（二酸化 炭素百万kg）	恒久的な燃料節減：平均 的な自家用車の年間二酸 化炭素排出量に換算 (単位：千台)
除草剤耐性ダイズ			
アルゼンチン	4,433	11,837	7,844
ブラジル	2,749	7,341	4,865
ボリビア、パラグアイ、ウ ルグアイ	899	2,401	1,591
米国	1,687	4,503	2,984
カナダ	255	681	451
除草剤耐性トウモロコシ			
米国	2,257	6,027	3,994
カナダ	121	323	214
除草剤耐性ナタネ			
カナダ：GM除草剤耐性ナ タネ	1,067	2,848	1,887
害虫抵抗性トウモロコシ			
ブラジル	369	984	652
米国、カナダ、スペイン、 南アフリカ	91	243	161
害虫抵抗性ワター世界	285	760	504
害虫抵抗性ダイズ-南米	449	1,199	795
合計	14,662	39,147	25,942

注：

1. 前提：2020 年の平均的な自家用車は、1km 当たり 123.4g の二酸化炭素を発生させる。
自動車は年間、平均 12,231km を走行し、1,509kg の二酸化炭素を発生させる。

2. GM 害虫抵抗性ワタ。インド、パキスタン、ミャンマーおよび中国は、殺虫剤を背負式噴霧器を用いて手作業で散布することを想定しているため、除外。

b) 追加的な土壌炭素の固定/隔離

北米や南米では「不耕起」(NT)と「減耕起」(RT)農法が広く採用され維持されてきた結果、土壌炭素が大幅に隔離(固定)されてきた(したがって二酸化炭素排出量が減少した)。これは、GM 除草剤耐性作物技術の使用によって促進されてきた。

2020年の北南米におけるRT/NT生産システムを用いたGM除草剤耐性作物の栽培面積に基づくと、2020年には57億5,000万kgの土壌炭素隔離の増加がみられたと推定される。これは、大気への二酸化炭素排出を211億100万kg防いだことに相当する。自動車に置き換えると、これは1,400万台分の1年間の二酸化炭素排出量に相当する(表3)。

表 3：炭素隔離の影響 2020年：自動車換算

作物/形質/国	追加で土壌に固定された炭素(炭素百万kg)	土壌炭素隔離による節減量(二酸化炭素百万kg)	土壌炭素の隔離による節減量:平均的な自家用車の年間二酸化炭素排出量に換算(単位:千台分)
除草剤耐性ダイズ			
アルゼンチン	1,832.5	6,725.2	4,445.8
ブラジル	1,485.0	5,450.1	3,611.0
ボリビア、パラグアイ、ウルグアイ	490.7	1,800.8	1,193.1
米国	110.9	407.0	269.6
カナダ	62.9	230.7	152.9
除草剤耐性トウモロコシ			
米国	1,481.6	5,437.6	3,602.7
カナダ	15.6	57.4	38.0
除草剤耐性ナタネ			
カナダ:GM除草剤耐性ナタネ	270.4	992.4	657.5
害虫抵抗性トウモロコシ			
ブラジル	0	0	0
米国、カナダ、スペイン、南アフリカ	0	0	0

害虫抵抗性ワタ-世界	0	0	0
害虫抵抗性ダイズ-南米	0	0	0
合計	<i>5,749.6</i>	<i>21,101.1</i>	<i>13,980.7</i>

土壌炭素隔離量の年間推定値を 1996 年から 2020 年の期間にわたって集計すると、1996 年以降に隔離された土壌炭素の増加量は、3,440 億 4,400 万 kg の二酸化炭素が大気中に放出されるのを防いだことに相当し、これは約 2 億 2,800 万台の自動車からの二酸化炭素排出量に匹敵する。しかし、この推定値は、この 25 年間に RT/NT システムの採用によって得られた真の土壌炭素隔離による恩恵を大幅に過大評価している可能性があることに留意すべきである。なぜなら、RT/NT システムによって得られた土壌炭素隔離の増加量の一部は、その後の当該作物の栽培における土地の耕起と生産システムによって失われてしまうからである。

全体として、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。

燃料関連の節減と土壌炭素固定の両方から得られる二酸化炭素排出削減量の 2020 年の分析に戻ると、これらの利益を集約した結果、2020 年の二酸化炭素削減量の合計は約 236 億 3,100 万 kg に相当し、自動車 1,560 万台分の 1 年間の二酸化炭素排出量と同じである。これは、英国における登録車の 49%に相当する。

(2022 年 10 月 バイテク情報普及会 訳)