

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23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結果をまとめたものである。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（図 1および図 2）。2018年のGM作物による農業所得の増加は世界全体で189.5億ドルであった（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5.8%増加させたことに等しい。1996年以降、農業所得の増加は2,250億ドルに達している。

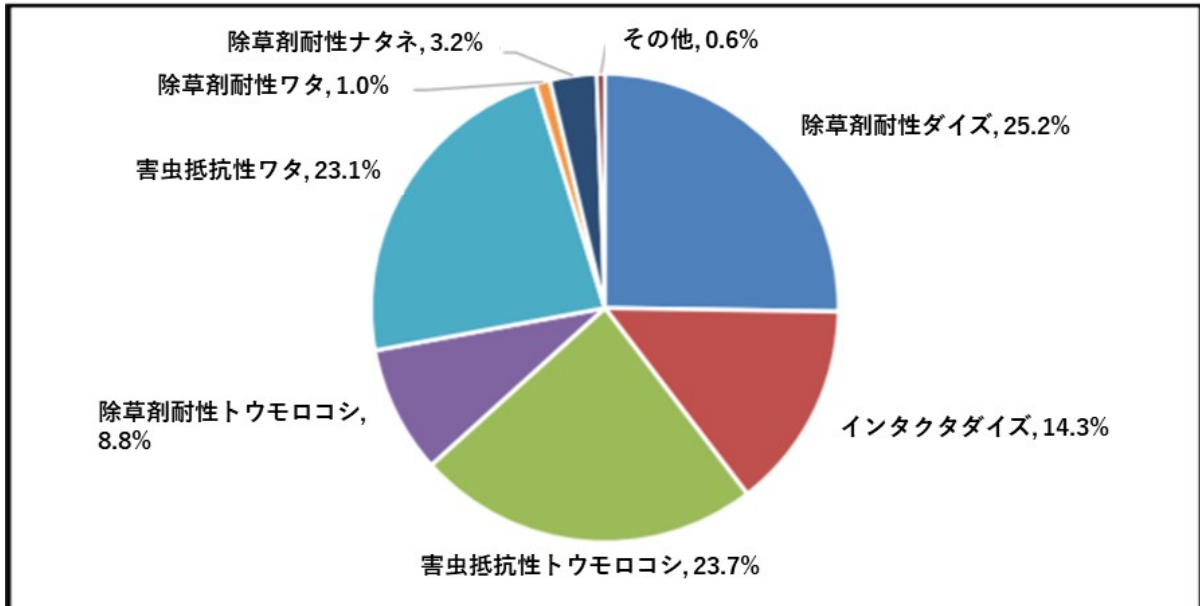
2018年に農業所得の増加が最も大きかったのはトウモロコシ部門で、主として収量増によるものである。2018年にGM害虫抵抗性トウモロコシにより生み出された45億3,000万ドルという所得増は、GM作物を生産する国におけるトウモロコシの生産額を6.2%増加させたのに等しい。言い換えれば、この所得増は2018年に世界のトウモロコシ生産額1,540億ドルの2.9%相当を増加させたのに等しい。1996年からの累計では、GM害虫抵抗性技術により、世界のトウモロコシ農家に595億ドルの所得増がもたらされている。

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2018年に45億7,000万ドル増加し、1996年以降、ワタ部門は累計で658億ドルの利益を得てきた。2018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13%増加させた、あるいは、世界全体のワタ生産額360億ドルの11.2%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つの技術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、2018年に農業所得を47億8,000万ドル増加させ、1996年以降累計で642億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6年目には27億2,000万ドルの農業所得の増加がもたらされ、2013年からの6年間で合わせて102億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71億ドルの所得の増加がもたらされた（1996年～2018年）。

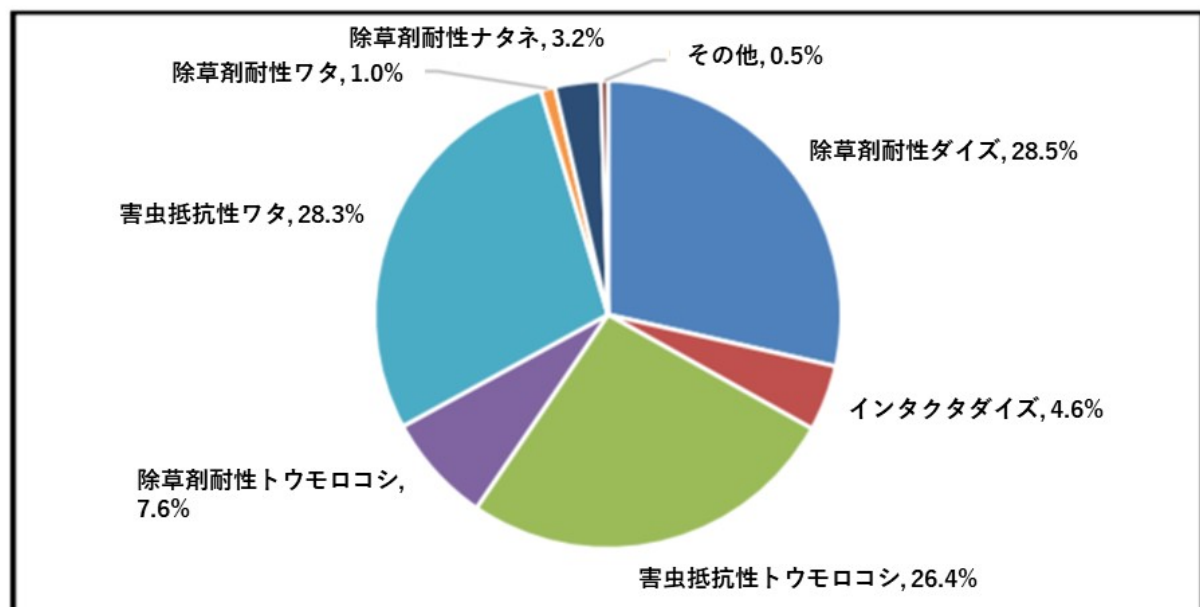
³ 詳細は第3章を参照。

図 1 世界的なGM作物の農業所得の増加 (2018年): 基準値合計189億5,000万ドル



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～2018年): 基準値合計2,250億ドル



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～2018年): 基準値合計2,250億ドル

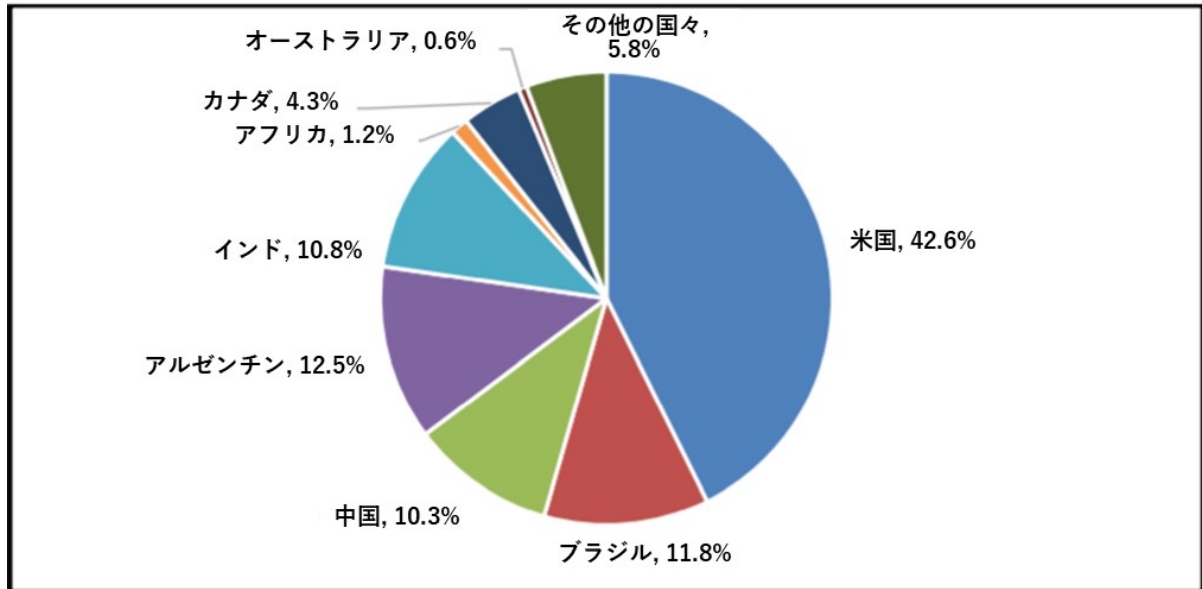
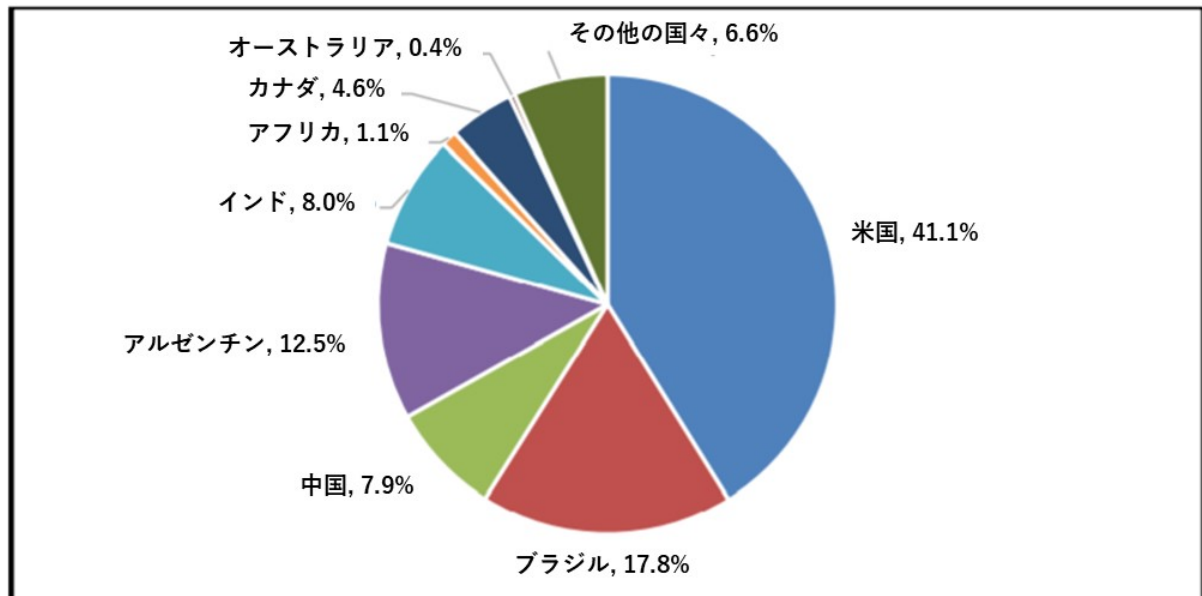


図 4 国別のGM作物の農業所得増加 (2018年): 基準値合計189億5,000万ドル



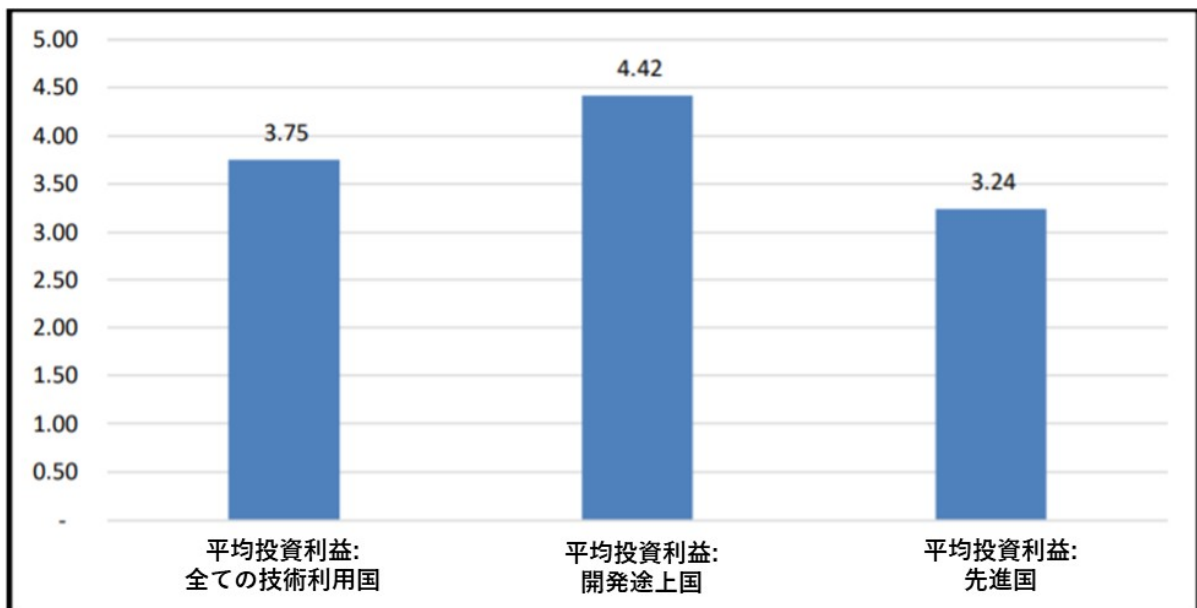
GM作物による農業所得増加を開発途上国全体と先進国全体で比較したところ、2018年の農業所得増加の53.8%を開発途上国の農家が得ていた。こうした開発途上国の農家の所得増加の大部分は、

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2018年の23年間に
もたらされた累計的な農業所得の増加の52%（1,171億ドル）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、2018年の費用総額は、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）遺伝子組換え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3.75ドルを
得ていることになる。開発途上国では、遺伝子組換え種子に対する投資額1ドル当たりの平均利益
が4.41ドルであるのに対し、先進国では平均利益は3.24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23%に相当し、一方、先進国では31%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。

図 5 2018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23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。2つの主要な形質、害虫抵抗性および除草剤耐性、で見ると、それぞれ総利益の56.9%

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。

と42.9%を占めている（その他の形質が0.2%）。利益のバランスは、第2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/生産による収益が変化してきている。よって、2018年の総利益の内訳は、収量/生産による収益が88%、経費削減が12%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92.2%、ワタの生産増の98.5%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、23年間での、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16.5%、ワタで13.7%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をもたらされている。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。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2018年の間にダイズの生産量が2億230万トン増加した（これはGM除草剤耐性品種によるダイズ生産の増加量全体の81%に相当する）。2013年以降、「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2,730万トン増加した。

表 1 GM作物の収量向上による生産量の増加

| | 1996～2018年の生産量増加 (百万トン) | 2018年の生産量増加 (百万トン) |
|--------|----------------------------|-----------------------|
| ダイズ | 277.63 | 35.30 |
| トウモロコシ | 497.74 | 47.87 |
| ワタ | 32.60 | 2.43 |
| ナタネ | 14.07 | 1.32 |
| テンサイ | 1.59 | 0.13 |

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（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7億7,600万kg減少している（8.6%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、19%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（3億3,100万kgの減少、この量は、GM害虫抵抗性ワタの栽培区域で使用された全殺虫剤量の32.2%に相当）、EIQ指数では34.2%の低減に貢献してきた（1996年～2018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（有効成分で1億1,240万kg; 59%減少）、これには環境面での便益も伴っている（EIQ負荷で63%減少）。

GMトウモロコシに対する除草剤使用量も2億4,240万kg、7.3%の減少を示している（1996年～2018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12.1%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、従来の作物に一般的に用いられるものより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500万kg（0.1%）増加してはいるものの（1996年～2018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12.9%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3,970万kg削減されており（21.9%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）31.6%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、先進国と開発途上国の間でそれぞれ48%と52%の割合で分配されていることが示されている（1996

⁶ 4.1項を参照。

年～2018年)。開発途上国の環境面での便益の61%は、GM害虫抵抗性ワタの使用によるものである。

図 6 2018年のGM作物を用いた場合の除草剤および殺虫剤の使用量の変化（有効成分（AI）の使用の変化（%）とEIQ負荷：有効成分使用量の削減基準値は5,170万kg)

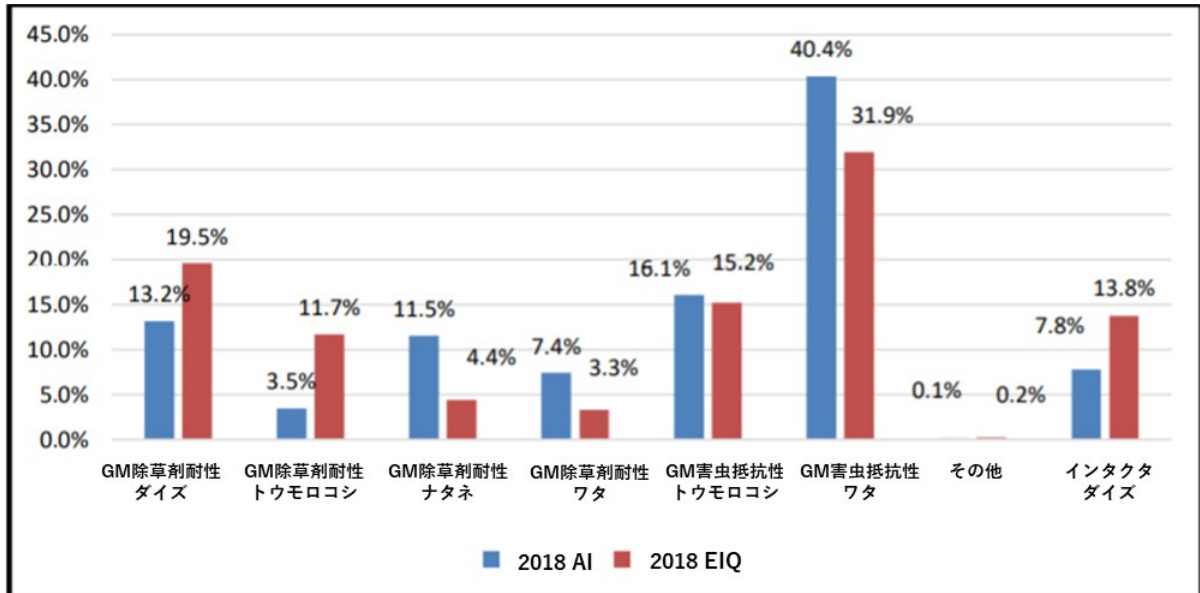
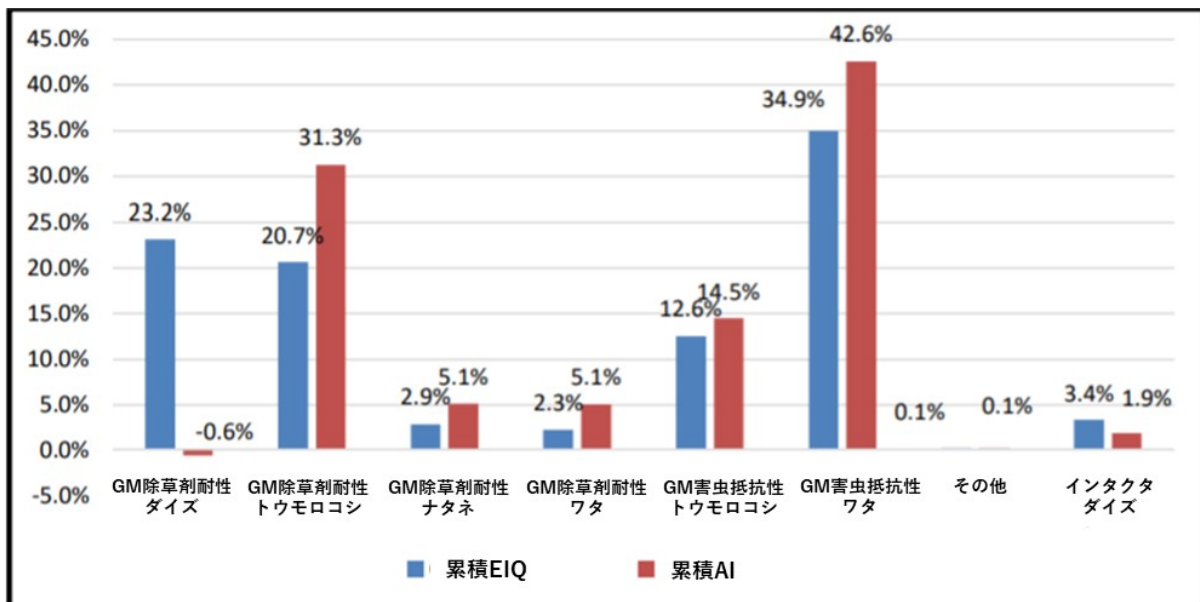


図 7 1996年から2018年のGM作物を用いた場合の除草剤および殺虫剤の累計使用量の変化（有効成分（AI）の使用の変化（%）とEIQ負荷：有効成分使用量の削減基準値は7億7,600万kg)



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用いる農家もあり、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41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50%から75%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の重点の変更は、雑草が既存の管理法に対する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に対する開発戦略の課題の範囲が広がっていることも反映している。さらに、他の除草剤に対して耐性を持つ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）も2016年から利用できるようになっている（特に米国でのジカンバおよび2,4-D）。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おり、この点は本稿で示したデータに反映されている。

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。2018年にはこの低減量が約24億5,600万kgに達した（燃料使用量9億2,000万リットルの削減による）。1996年から2018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341億7,100万kg相当と推定される（127億9,900万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 農法の採用拡大による土壌炭素の隔離。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整地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

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。

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、2018年には追加的に56億800万kgの土壤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205億8,100万kg防いだことに相当する）。

土壤の質が毎年改善されることから、土壤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、複数年にわたる土壤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壤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2018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3,023億6,400万kgという数字は注意を持って取り扱う必要がある。

こうした土壤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 2）、以下のことが示されている。

- 2018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160万台分の炭素排出量に相当する。
- 2018年の土壤炭素隔離の前年比推定増加量は、自動車1,360万台分の炭素排出量に相当する。
- 2018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壤炭素隔離の増分を合わせて、自動車1,530万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48.5%に相当する。
- 1996年以降の土壤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23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3,023億6,400万kgになる。これは自動車2億30万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 2 炭素隔離に対する影響の状況 (2018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) |
|--------------------|-------------------------------------|--|------------------------|---------------------------|
| 除草剤耐性ダイズ | | | | |
| アルゼンチン | 629.1 | 416.8 | 6,376.5 | 4,224.9 |
| ブラジル | 516.1 | 342.0 | 5,231.8 | 3,466.3 |
| ボリビア、パラグアイ、ウルグアイ | 169.5 | 112.3 | 1,717.8 | 1,138.1 |
| 米国 | 104.7 | 69.4 | 463.2 | 306.9 |
| カナダ | 54.5 | 36.1 | 287.1 | 190.2 |
| 除草剤耐性トウモロコシ | | | | |
| 米国 | 383.7 | 254.2 | 5,358.7 | 3,550.5 |
| カナダ | 20.7 | 13.7 | 58.5 | 38.8 |
| 除草剤耐性ナタネ | | | | |
| カナダ | 215.5 | 142.8 | 1,087.8 | 720.7 |
| 害虫抵抗性トウモロコシ | | | | |
| ブラジル | 93.9 | 62.2 | 0.0 | 0.0 |
| 米国、カナダ、南アフリカ、スペイン | 11.2 | 7.4 | 0.0 | 0.0 |
| 害虫抵抗性ワタ | | | | |
| 世界 | 52.2 | 34.6 | 0.0 | 0.0 |
| 害虫抵抗性ダイズ | | | | |
| 南米 | 204.8 | 135.7 | 0.0 | 0.0 |
| 合計 | 2,455.9 | 1,627.2 | 20,581.4 | 13,636.4 |

注:

1. 仮定: この報告書のこれまでのすべての版において、英国の平均的なファミリーカーは1 km当たり二酸化炭素150 gを排出し、年に15,000 km走行し、したがって年に2,250 kgの二酸化炭素を排出すると著者らは仮定した。二酸化炭素排出量が少ない車が導入され、1台の車が年間に走行する距離が減少する傾向にあることから、著者らは2018年については1 km当たりの二酸化炭素排出量 123.4 g (<https://www.eea.europa.eu/highlights/average-co2-emissions-from-new>)、年間走行12,231 kmというデータを使用した。 (https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/823068/national-travel-survey-2018.pdf 15ページ)。これは、年間1,509.3 kgの二酸化炭素に相当する。
2. 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除草剤耐性ダイズの数値に含まれる。

(2020年8月 バイテク情報普及会 訳)