

除草剤耐性作物とグリホサート抵抗性雑草の現状と課題

モンサント・カンパニー John K. Soteres・Jose Rafael Prado
日本モンサント(株) 脇森裕夫・山根精一郎

はじめに

グリホサート耐性作物の導入は、雑草防除に大変革を起こし、農業生産者にとどまらず社会全体に対して大きな経済的・環境的恩恵をもたらした。「Roundup Ready[®]革命」とも呼ばれている。この技術は急速に普及し、雑草防除の主たる除草剤としてグリホサートが選ばれるようになった。この技術の急速な普及には、グリホサートの性能、利便性、経済性、作物に対する安全性などのグリホサートが持つ長所によるところが大きい。グリホサート耐性作物を栽培するとグリホサートを作物の生育期間中に散布できるため、不耕起栽培を含む減耕起栽培の拡大につながり、そのことが耕作地からの土壌および肥料等の流亡を抑制すると同時に、農作業から生じる二酸化炭素総排出量の削減を通じて環境面での重要な利点となっている。グリホサートは、他の除草剤や機械による除草作業を必要とせず、防除対象の雑草すべてを防除することができるため、多くの農業生産者は雑草防除にグリホサートだけを使用する傾向があった。他の除草剤や除草法を用いずに長年グリホサートのみに頼ったことが、グリホサートに抵抗性を持つ雑草が出現する原因になった。しかし、雑草群落におけるグリホサート抵抗性雑草の発生頻度は、他の除草剤と比較して多くの種で非常に低いと考えられている。グリホサート抵抗性雑草がこれ以上出現し拡大することがないよう、農業生産者に対し、官民セクターの専門家はより多様な雑草防除プログラムを使用するよう助言している。官民両セクターにとっては、雑草防除プログラムの成功事例とそのメリットを農業生産者に教育することが、最大の優先課題となっている。米国の最近の傾向では、グリホサート耐性作物に多

様な雑草防除プログラムを取り入れる動きが進んでおり、グリホサート耐性作物栽培システムがもたらしてきた多くのメリットを維持するのに役立つと期待されている。またグリホサート抵抗性雑草が出現した米国で得られた教訓は、グリホサート抵抗性雑草のリスクを回避し、問題が発生するのを予防する目的で米国以外の国でも共有されつつある。しかし、最近、複数の研究者が、グリホサート抵抗性雑草の出現を理由としてグリホサート耐性作物の利点に疑問を呈している。本稿では、グリホサート耐性作物に代表される除草剤耐性作物の導入状況を概説し、この技術がもたらすメリットを検証し、グリホサート抵抗性雑草問題に関する疑問に応え、使用場面での管理責任体制（スチュワードシップ）・プログラムと開発中の新しい除草剤耐性形質についても簡単に紹介する。

除草剤耐性作物の世界的状況

1996年以来、除草剤耐性は遺伝子組換え作物形質の主流となり、グリホサートへの耐性を付与する品種が主要な遺伝子組換え品種になっている。2012年の栽培面積は、除草剤耐性（HT）作物が1億50万ha（遺伝子組換え作物の総栽培面積の59%）で、除草剤耐性と害虫抵抗性（IR）を掛け合わせた（以下スタックと呼ぶ）作物が4,370万ha（26%）である（図-1）（James 2012）。除草剤耐性ダイズだけで全遺伝子組換え作物の47%を占め、次いで除草剤耐性と害虫抵抗性のスタックトウモロコシが23%を占めている（図-2）。1996年の商業栽培開始から2012年までの世界の遺伝子組換え作物による経済的なメリットの累積額は、1,020億ドル（10兆200億円）と試算されている（James 2012）。

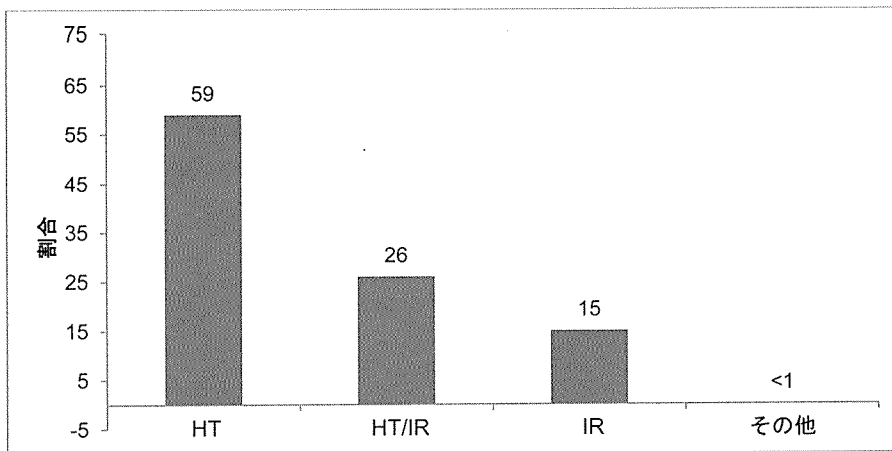


図-1 形質別に示した全遺伝子組換え作物の割合 (2012年)
HT = 除草剤耐性、IR = 害虫抵抗性、HT/IR = HT と IR のスタック形質。

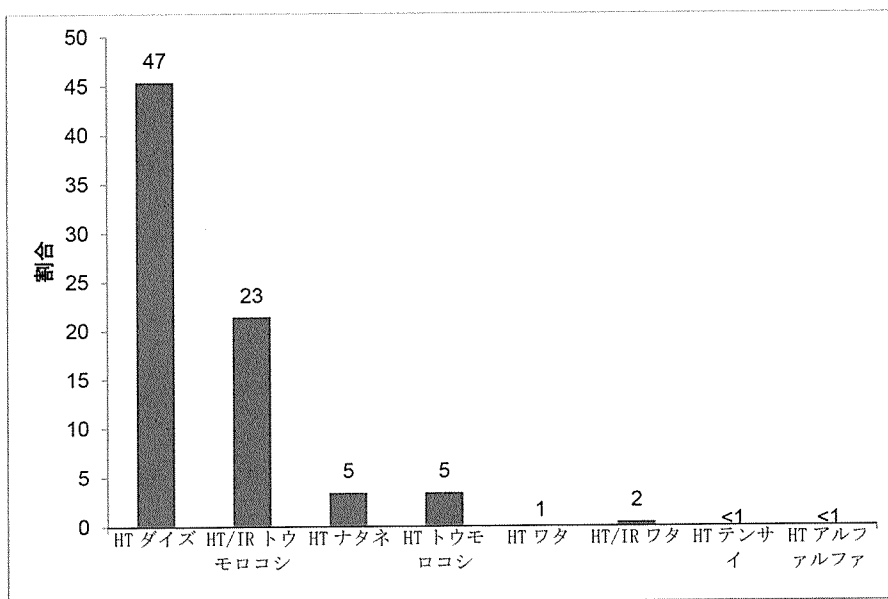


図-2 作物別、形質別に示した遺伝子組換え作物の割合 (2012年)
HT = 除草剤耐性、IR = 害虫抵抗性、HT/IR = HT と IR のスタック形質。

除草剤耐性作物のメリット

除草剤耐性作物の導入により、除草方法は選択性除草剤を複数使用する方法からグリホサートのような非選択性除草剤への移行が促された。この変化は、除草剤による薬害の軽減、雑草防除の改善、生産コストの低減、潜在収量が確保されることによる生産量の増加、不耕起栽培を含む減耕起

栽培（これ自体が環境に対する農業の影響を劇的に改善する）の拡大といった多くのメリットにつながっている。こうした除草剤耐性作物のメリットは、栽培管理、経済、環境の3つの分野のメリットに大別できる。

栽培管理におけるメリット

除草剤耐性作物が広く普及したのは、非選択性除草剤グリホサートによるところが大きい。グリホサートは、様々な生長段階の数百種のイネ科雑草および広葉雑草を防除する能力を持ち、グリホサート耐性遺伝子の導入により作物選択性が確立されてからは、より多くの農業生産者に選ばれる除草剤となった。初のグリホサート耐性作物が市場に出た時点で、すでに多くの雑草群落がALS阻害型やACCase阻害型をはじめとする選択性除草剤に抵抗性を持っていた。グリホサート耐性作物の栽培とグリホサートの使用は農業生産者にこれらの除草剤に代わるオプションを提供しただけでなく、雑草防除プログラム実施の利便性と柔軟性を向上させたのである (Dill, Cajacob *et al.* 2008)。除草剤耐性作物の普及は、多くの場合、比較的速いペースで進んだ (James 2012)。

雑草防除

除草剤耐性作物の主なメリットは、より効果的な雑草防除を可能にし、雑草防除システムがより簡素で便利になることである。除草剤耐性作物導入前は、農業生産者は土壌処理除草剤または茎葉処理除草剤、またはその両方を組み合わせて使っていたが、グリホサートやグルホシネートを除草剤耐性作物と組み合わせて使用することで、発生してきたすべての雑草をより安定的に防除できるようになり、雑草防除の柔軟性が増す結果となった。さらに、除草剤耐性作物のメリットは、大規模・小規模いずれの農業生産者の優先課題にも合致することであった。たとえば、最新の米国の調査によると、農業生産者の大多数は除草剤選択の重要な点として、収量確保、安定した雑草防除効果、作物に対する安全性、雑草のない農地（効果的な雑草防除）を挙げており、グリホサート耐性作物に散布されるグリホサートはこれらのすべてを備えている (Hurley 2009)。除草剤耐性作物を栽培する農業生産者を対象とした別の調査では、15～26%の農業生産者が除草剤耐性作物を導入した理由として雑草防除にかかる時間の削減を挙

げていた (Marra, Piggott *et al.* 2004; Fernandez-Cornejo and Caswell 2006)。

高い生産性、安定した収量、減収リスクの軽減

除草剤耐性作物の導入は、主に水分・土壌養分・日光を競合する雑草を防除することで作物損失を減らすことにより、生産性と収量の向上をもたらした (Gianessi 2008; Finger, El Benni *et al.* 2011)。最近の調査では、除草剤耐性作物を導入した農業生産者は従来型作物を栽培する農業生産者に比べて収量が増えることが多いことが示されている (Carpenter 2010)。別の調査でも、除草剤耐性ダイズ生産者の63%、除草剤耐性トウモロコシ生産者の67%、ワタ生産者の60%が除草剤耐性作物導入の理由として収量の増加を挙げている (Fernandez-Cornejo and Caswell 2006)。さらに、発展途上国の生産者は、先進国と比較して収量の増加が大きいと考えられる。たとえば、先進国では除草剤耐性ダイズの導入により平均7%収量が増加し、途上国では平均21%増加したといわれる。除草剤耐性トウモロコシを導入した途上国では85%という高い収量増も報告されている (Carpenter 2010)。小規模生産者と途上国の生産者で収量増加幅が比較的大きいのは、途上国では先進国の生産者よりも低い収量であり、その低い収量と比較したことによるためだと考えられる (Carpenter 2010; Gianessi and Williams 2011; James 2012)。

収穫物の質と作物に対する安全性の向上

除草剤耐性作物と合わせて導入される雑草防除プログラムは、雑草種子や収穫後の作物残渣など異物混入を減らすことによって、収穫物の質を向上させている (Shaw and Bray 2003)。たとえば、米国のダイズ生産者を対象とした調査では、収穫した除草剤耐性ダイズの異物混入は従来型ダイズより平均26%少ないことが示された。除草剤耐性ダイズの平均異物混入率は1～2%である。除草剤耐性作物の利用は、除草剤による薬害リスクも低減する。従来型の作物を生産する農地の雑草防除では、複数の茎葉処理除草剤の散布が必要であり、雑草の除去には効果があっても、作

物に害が出ることがしばしばあった (Padgett, Re *et al.* 1996; Carpenter and Gianessi 1999)。しかし、非選択性除草剤に対して耐性を持ち、作物が発芽した後でも使用できる除草剤耐性作物の導入によって改善された。

経済的なメリット

除草剤耐性作物を含めた遺伝子組換え作物の導入は、コスト削減と生産性の向上および収入の増大により、農業生産者の経済的利益を向上させた。1996年から2011年までの遺伝子組換え作物の導入による経済的なメリットの累積額は、全世界で982億ドル(9兆8,200億円)と推定されている (James 2012; Brookes and Barfoot 2013 a,b)。この期間中、遺伝子組換え作物からの経済的メリットが最も大きかったのは米国で436億ドル(4兆3,600億円)と推定され、次いでアルゼンチンの140億ドル(1兆4,000億円)となっている (James 2012)。しかし、2011年の単年度を見ると、経済利益の多くは発展途上国の生産者に移り、先進国の96億ドル(9,600億円)に対して途上国では101億ドル(1兆100億円)となった (James 2012)。特に除草剤耐性作物の導入は農地の内外いずれにも大きな経済的メリットをもたらしている (Gianessi 2008)。除草剤耐性作物は、生産コストおよび雑草防除コストを下げ、収量と収入の増加を後押ししている。

雑草防除コストの低減

除草剤耐性作物の導入でコスト削減ができるのは、除草剤と燃料費の削減による雑草防除コストの削減による。具体的には、1999年から2005年にかけてグリホサートの価格は大幅に下がり、農業生産者に雑草防除コストの低減と経済的メリットの増加をもたらした (Brookes and Barfoot, 2013 a,b)。アルゼンチンでは、除草剤耐性ダイズを導入した生産者は、生産コストが10%削減され、1ヘクタール当たり23ドルの追加収入を得ていると推定されている (Qaim and Traxler 2005)。これに加えて、使用する除草剤の種類が少なくなったこと、不耕起を含む減耕起によって

燃料使用が減ったこと、さらに除草剤散布の回数が減少したことなどからもコストが削減されている (Brookes and Barfoot 2013 b,c)。

1996年から2011年、除草剤耐性作物の導入は全世界の農業生産者の所得を増やし、経済的メリットは世界全体で累積で推定410億ドル(4兆1,000億円)増えたとされている (Brookes and Barfoot 2013 b)。また、農業上のメリットと同様、発展途上国の農業生産者は除草剤耐性作物の利用から最も大きな経済的メリットを得ていると見られる (Carpenter 2010; James 2012)。たとえば、アルゼンチンでは、除草剤耐性ダイズの導入により43%の除草剤コストが節約されたと推定される (Qaim 2005)。除草剤耐性ダイズの導入は、1996年から2011年までに全世界の農業生産者所得を322億ドル(3兆2,200億円)増やしたといわれる (Brookes and Barfoot 2013 a,b)。うち約106億ドル(1兆600億円)は、1シーズンに栽培できる作物が増えたことによる収量増によるものである。残りの216億ドル(2兆1,600億円)はコスト削減が理由である。2011年単年の除草剤耐性ダイズによる経済的なメリットは39億ドル(3,900億円)と推定される。一方、除草剤耐性トウモロコシの導入も農業生産者所得の増加につながっている (Brookes and Barfoot 2013 a,b)。1996年から2011年までの経済的なメリットの累積額は42億1,000万ドル(4,210億円)とされている。うち18%は収量の増加から、残りは生産コストの低減によるものである。2011年単年では全世界で15億4,000万ドル(1,540億円)の経済的なメリットが実現した。同様に、除草剤耐性ワタの利用により1997年から2010年で推定12億2,000万ドル(1,220億円)農業生産者所得が増えたとされている。90%近くがコスト削減によるものである。除草剤耐性ワタの2010年の経済的なメリットは、1億6,700万ドル(167億円)に上ると推定される。

アルゼンチンでは、除草剤耐性ダイズの導入により同じ生育期にもうひとつの作物を栽培できるようになることで、農業生産者所得が増えた

(Brookes and Barfoot 2005)。この農法は二毛作と呼ばれるが、耕起の削減または廃止に伴う時間節約により、ダイズ収穫の後に小麦など二作目の作物を栽培することが可能になり、この二毛作が推進されている。

同様な経済的メリットは除草剤耐性トウモロコシにも見られる (Brookes and Barfoot 2013 a,b)。たとえば、1997年以降、除草剤耐性トウモロコシ導入による米国での経済的なメリットの累積額は31億1,000万ドル (3,110億円) と推定され、2011年単年で8億8,500万ドル (885億円) である。また、ある研究では、除草剤耐性ダイズを導入した米国の生産者は平均して14.5%農作業に向けられた家族労働時間減らすことができ、これにより余暇の時間が増えたとの推定もある (Gardner, Nehring *et al.* 2009)。このデータは、除草剤耐性ダイズの米国における導入が農業以外での収入も増やすことにより、農業生産者所得全体をさらに増やしたとする研究結果とも一致する (Fernandez-Cornejo, Hendricks *et al.* 2005; Gianessi 2008)。

環境に対するメリット

除草剤耐性作物の導入は、温室効果ガス排出や燃料消費の削減、土壌の流亡の削減、良好な土壌の保持、生物多様性の増大などにより、環境に様々な重要なメリットをもたらしている。これらのメリットは、主に除草剤耐性作物の導入によるトラクターの運用削減と減耕起の普及によるものである (Cerdeira and Duke 2006)。現代の農業生産における耕起の第一の目的は雑草防除であり、除草剤は農業生産者が作物の栽培前後に耕起する必要性を削減できる道具である。グリホサートのような雑草発生後に使用できる非選択性除草剤と除草剤耐性作物を導入したことにより、減耕起の導入を促し拡大したことが示されており、これが多くの環境に対するメリットをもたらしている (Marra, Piggott *et al.* 2004; Qaim and Traxler 2005; Carpenter 2010; Fernandez-Cornejo 2012)。除草剤耐性作物の使用は土地の

生産性を高め、森林伐採の速度を減少させることにより生物多様性と野生生物の生息地を保護するのに寄与している (Raven 2010)。たとえば、除草剤耐性のような遺伝子組換え作物による生産性の向上がなかったとすると、トウモロコシ、ダイズ、ワタおよびカノーラの現在の収穫量を生産するのに2011年だけで1,550万ヘクタールの新たな農地の拡大が必要だった (PG Economics 2013; Brookes and Barfoot 2013 b)。

減耕起栽培のメリット

除草剤耐性作物の栽培においては、植え付け前の耕起と生育期間中の中耕 (in-crop cultivation) を削減したりあるいは完全に止めても、雑草防除が可能となるため、除草剤耐性作物の導入により減耕起栽培が拡大した。この農法は、耕起せず前作の植物残渣の中に直接播種するか、種子を播種するための溝を切り作物の種子を播くというものである。耕起作業を減らすことで土壌流亡とそれがもたらす水と空気の汚染という悪影響を減らすことができる。減耕起栽培では、植物残渣が農地に残され、土壌養分と有機バイオマスの量が増えることにより肥料の使用量も削減され、土壌の質が向上する。また不耕起栽培を含む減耕起栽培では土壌流亡が減少して養分の消失が抑えられ、土壌養分、土壌、除草剤の流亡等による水質汚濁を減少させることができる (Cerdeira and Duke 2006; Borggaard and Gimsing 2008; Shipitalo, Malone *et al.* 2008)。この栽培法はトラクターにより土壌表面から失う水分をおさえることにより土壌水分を保持することができる (Cerdeira and Duke 2006)。また土壌を耕す回数が減るため、土壌圧縮も軽減される (Cerdeira and Duke 2006)。不耕起・減耕起により昆虫の幼虫や土壌の有益な微生物の種類と数を増やすため、土壌の生物多様性が豊かになる。この土壌の生物多様性も貢献している (Carpenter 2011)。

温室効果ガスの削減

除草剤耐性作物を導入すると、農薬散布回数

走行削減、燃料消費の節約に結びつき、温室効果ガス排出が削減された (Brookes and Barfoot 2013 b,c)。2011年単年でも、米国・アルゼンチン・ブラジルにおいて除草剤耐性ダイズの栽培により燃料消費が4億7,500万リットル減り、二酸化炭素排出量が12億6,700万kg減少した (年間56万3,000台の車を道路から排除するのと同等の効果)。さらに、耕起の減少により土壌中の炭素隔離 (二酸化炭素の放出抑制) が増加する。たとえば、米国・アルゼンチン・ブラジルでの除草剤耐性ダイズ利用による減耕起の導入により、2011年、土壌の炭素隔離は148億9,800kgと推定され、年間660万台の車を道路から排除するのと同等の効果があった (Brookes and Barfoot 2013 b,c)。

除草剤使用と環境プロファイル

現在の除草剤耐性作物のメリットは、非選択性除草剤に耐性があるという点であり、これにより1種類の非選択性除草剤で複数の選択性除草剤を置き換える事となる。除草剤耐性作物と合わせて使用される主要な除草剤であるグリホサートは、優れた環境プロファイルと安全性プロファイルを持っており、分解が早く、土壌に落ちると除草作用がない (Cerdeira and Duke 2006)。その結果、除草剤耐性作物の利用によって使用され

る除草剤の数量ともに低減されている (Gianessi 2008; Brookes and Barfoot 2013 b,c)。たとえば、1995年、米国で栽培されたダイズ栽培面積の5%以上に18種類もの除草成分が使用されていたが、2006年に栽培面積の5%以上に使用された除草成分はグリホサートと2,4-Dだけであった (USDA 1995, 2006)。同様の結果は、除草剤耐性ワタについても、1997年と2005年の比較で明らかになっている (Gianessi 2008)。世界全体では、1996年から2011年までの間に、除草剤耐性作物の導入により、2億3,500万キログラムの除草剤成分を削減されたと推定されている (図-3) (Brookes and Barfoot 2013 b,c)。米国においては、1996年から2011年の間に削減された除草剤成分の量は、除草剤耐性ダイズでは3,010万トン、除草剤耐性トウモロコシでは1億8,020万トンとされている (Brookes and Barfoot 2013 c)。

グリホサート抵抗性雑草

除草剤抵抗性とは、防除対象の雑草群落に通常の散布量 (ラベル表示量) の除草剤を散布しても枯れず、その生活環を全うすることができるようになる能力のことである。除草剤に抵抗性のある個体が多数を占める集団が出現する原因は、他の防除手段を使用しない状況下で、特定の除草剤に

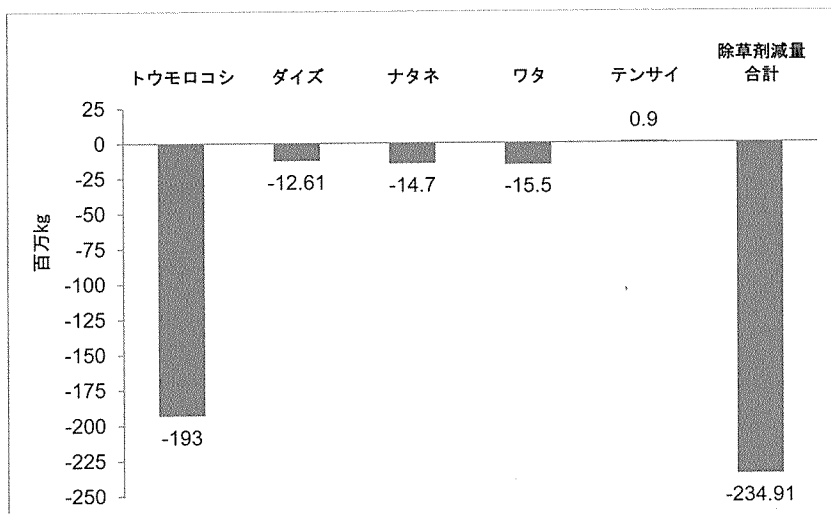


図-3 1996年から2011年にかけての世界における除草剤成分の使用量の変化 (単位: 百万 kg)

よる淘汰圧が繰り返えしかかったことによると考えられている。除草剤が植物に突然変異を生じさせて植物が抵抗性を持つようになるとは考えられておらず、むしろ集団の中で除草剤による自然淘汰が起きたと考えられている。また、雑草種が作物種と遺伝的・生殖的に和合性がある場合は除き、除草剤抵抗性の雑草群落は、遺伝子組換え作物から除草剤耐性遺伝子が伝播した結果ではない。こうした除草剤抵抗性雑草群落の出現は、今日使用されている除草剤の多くで確認されている(Heap 2012)。

特定の除草剤に対する抵抗性雑草が出現する速度は、抵抗性を付与しうる変異遺伝子の出現頻度、および淘汰圧によっている。すべての除草剤に対して均等に抵抗性雑草が出現する訳ではなく、ALS阻害型除草剤では導入後3~6年と比較的早く抵抗性雑草が出現したが、グリホサート除草剤では導入後20年以上と比較的遅く抵抗性雑草が出現している(Heap 2012)。グリホサート抵抗性雑草の出現が遅いことの理由は十分に解明されていないが、可能性としては(1)EPSPS酵素は非常に変異しにくいことと、(2)グリホサート抵抗性を発現するには遺伝子の複数部位の変異が必要であること、などが挙げられる。いずれにせよ、除草剤抵抗性雑草の対策において、雑草群落に対する除草剤の淘汰圧を管理することが鍵となる。作用機作が異なる複数の除草剤を使う、種々の機械除草や栽培法と組み合わせて除草剤を使用するなど、多様な管理を行うことが除草剤抵抗性雑草に対処する基本的な方法である(Norsworthy, Ward *et al.* 2012; WSSA 2012)。

グリホサート抵抗性雑草の出現は、1990年代中ごろにオーストラリアとマレーシアで初めて確認されている。最初の抵抗性雑草群落は従来からある非農耕地または多年生作物へのグリホサートの使用場面において発生したものだった。オーストラリアでは、ライグラス(*Lolium* spp.)のグリホサート抵抗性集団が、20年以上にわたってグリホサートを作物の作付け前に使用していた地域で見つかっている(Powles, Lorraine-Colwill *et*

al. 1998)。マレーシアでは、グリホサート抵抗性ヤエムグラ(*Eleusine indica*)がオイルパームの雑草防除に15年以上グリホサートを使用したプランテーションで発見されている(Lee, Ngim *et al.* 2000)。いずれの事例も、グリホサートが長年にわたり唯一の雑草防除法になっていた。これら最初のグリホサート抵抗性雑草の出現が確認されて以来、グリホサート抵抗性を持つ雑草群落が各地で確認され、現在までに合計で24種の雑草にグリホサート抵抗性群落が報告されている(Heap 2012)。こうした事例から、ひとつの共通した要因が明らかになっている。それは、他の雑草防除方法(他の除草剤または機械除草)が使用されない中で、グリホサートだけがほぼ唯一の除草剤として、長年にわたって使用されていたことである。要するに、雑草防除方法としての多様性がほとんどなかったのである。この多様性の欠如という点が、1974年のグリホサート発売以来使用され続けていた地域と同様に、グリホサート耐性作物の場面でグリホサート抵抗性雑草が出現した原因であると考えられている。グリホサートが雑草防除のオプションとして農業生産者に選ばれている地域においては、雑草防除法の多様性の向上こそが、抵抗性雑草の出現を遅延または防止する方法である。抵抗性雑草の発生をモデル化した研究では、さらなる抵抗性雑草の出現を防ぐために、農業生産者がグリホサートの使用を中止したり、グリホサート耐性作物の栽培を中止したりする必要はないことが示されている(Neve, Diggle *et al.* 2003; Beckie 2011; Neve, Norsworthy *et al.* 2011; Neve, Norsworthy *et al.* 2011)。遺伝子組換え作物も含め、除草剤に対して耐性を持つ作物を栽培すること自体は除草剤抵抗性雑草の原因ではなく、全体的な雑草防除システムの中でどのように除草剤を使用するかが重要である(Owen, Pedersen *et al.* 2010)。これはグリホサートに限らず他の除草剤についても言えることであり、長期の圃場試験(Beckie and Reboud 2009)やモデル試験(Neve, Norsworthy *et al.* 2011; Neve, Norsworthy *et al.* 2011)でも立証されている。

グリホサート耐性作物によりグリホサートが使用できるようになる前は、農業生産者は多くの種類の雑草を除草するために除草剤を組み合わせる必要がある。トウモロコシについていえば、典型的な雑草防除法は作物の播種後出芽前に2種類の土壌処理除草剤散布、その後、土壌処理除草剤の効果の発現に必要な土壌水分が不足するなどの環境要因によって除草剤散布で早期に防除できなかった雑草を防除するために、茎葉処理除草剤の散布または中耕、またはその両方を行っている。同様のシナリオはダイズやワタでも見られるが、ワタではさらに2~3回の茎葉処理除草剤の散布が一般的であった。ワタは畦間に葉影が伸びるのが遅く、その間に雑草が発芽し生育するからである。グリホサート耐性作物の導入後、農業生産者はこれらの除草剤の代わりにグリホサートだけを使用して、雑草が発芽した後必要に応じて散布すればよいことを知った。多くの研究で、グリホサート単独の雑草防除システムに移行することによって農業生産者が作物をより効果的かつ経済的に管理できることが証明されている (Reddy and Whiting 2000; Culpepper *et al.* 2000; Nolte and Young 2002)。また、グリホサート単独の雑草防除システムは、不耕起栽培を含む減耕起栽培に適していることが分かり、土壌・水分・養分を保全できる重要な方法として活用され、農業生産者はより多くの面積をこの方法で耕作するようになった。これらの理由から、グリホサート耐性作物は、商品化されたすべての国で急速に広まったのである。

グリホサートが唯一の除草剤として長年にわたって使用され、かつ他の雑草防除法が使用されないグリホサート耐性作物の農地では、グリホサートによる淘汰圧が高まり、グリホサート抵抗性雑草群落が発現・拡大した。グリホサート耐性作物の栽培におけるグリホサート使用が原因となったグリホサート抵抗性雑草群落の最初の例は、2000年にグリホサート耐性ダイズ栽培で報告され、雑草はイズハハコ属 (アレチノギクの仲間) (*Conyza* spp.) であった。他の国でも、イズ

ハハコ属は最初にグリホサート抵抗性が出現することが多い雑草であり、グリホサート抵抗性が出現する可能性が高い属として知られている。この事例以降、2004年から2005年にグリホサート耐性ワタやダイズ栽培から、アマランサス属 (*Amaranthus* spp.) やブタクサ (*Ambrosia* spp.) にグリホサート抵抗性集団が報告された (Heap 2012)。どの地域においても、グリホサート除草剤抵抗性雑草の広がりに関する質的な推定は存在するが、正確に抵抗性雑草の発生面積を推定するには時間と費用を要することから一貫性のある基準による発生面積の推定はこれまでのところ行われていない。たとえば、あるカナダの市場調査会社は2012年に米国のグリホサート抵抗性雑草の発生面積はおよそ6,000万エーカー (2,400万ha) であると推定した (www.stratusresearch.com) が、これはグリホサート耐性作物の栽培面積の約30%にあたる。しかし、実際問題として、農業生産者にとって大切なのは、自分の農地に除草剤抵抗性雑草が存在するかどうか、そしてそれに対する適切な対策は何かということであって、抵抗性雑草の発生面積を正確に算出することは、抵抗性雑草の個体群がある地域にいつ出現するかを知ることに比べればさして重要ではない。一般に、抵抗性雑草が発現した後に広がる速度は、その雑草種の花粉の量や種子がどれだけ他の地域に移動しやすいかといった雑草種の生物学的な要因に依存している。たとえば、抵抗性のイズハハコ属 (*Conyza* spp.) は種子が風によって広範囲に広がるため急速に発生面積が拡大した。同様にアマランサス属 (*Amaranthus* spp.) は雄株と雌株が存在する他花受粉の植物であるため広範囲に大量の花粉が飛ぶことが知られている。

新しい抵抗性雑草群落や種が確認されるにつれ、モンサント・カンパニーおよび政府の雑草研究者は、雑草防除法を変更してもっと多様な雑草防除プログラムを積極的に実施するよう農業生産者に訴える努力を強化する必要があることを認識した。抵抗性雑草群落が広がるのに伴い、農業生産者もグリホサートに抵抗性を持つ雑草を防除す

るために雑草防除法を変更する必要に迫られた。基本的な変更とは、グリホサート耐性作物が導入される前に使われていた耕作法や除草剤の一部を取り入れることであった。しかし、グリホサート抵抗性雑草群落を防除するために耕作法を変更しなければならなくなった農業生産者も、グリホサートを中心に雑草防除システムを構築する方が、グリホサートを使わないシステムに戻るよりも優れていると考えていることが明らかになっている (Piggott and Marra 2008)。これは、グリホサートが非常に多くの種類の雑草を防除出来るからであり、すべての農業システム (不耕起を含む減耕起、従来型耕起) において使用できる最も有効な製品だからである。また、抵抗性雑草群落が出現する前に予防的に実施すべき多様な雑草防除システムは、グリホサートの使用を中心としない雑草防除システムや、グリホサート抵抗性雑草が農地に定着してしまった後に実施すべき雑草防除システムよりも、除草剤の使用がより少なくて済むことが分かっている (WSSA 2012)。更に、グリホサート抵抗性雑草群落がすでに出現していたとしても、グリホサート耐性雑草防除システムの環境に対する主要なメリットは維持されていることも重要である。

グリホサート抵抗性雑草の影響

どのような除草剤であっても抵抗性雑草が出現・拡大すれば、生産者は雑草防除法の変更を余儀なくされる。この変更として考えられるのは、除草剤の切り替えや混合あるいは体系処理による除草剤の追加、中耕、被覆作物、他の作物との輪作など栽培法の変更などである。米国では、グリホサート抵抗性雑草群落の出現・拡大により、生産者は主にグリホサートを使用しながら、グリホサート耐性作物に別の除草剤または雑草防除法、またはその両方を使用している。これは、抵抗性雑草群落が出現しても、グリホサートの利用に生産者が価値を見出していることを意味する (Hurley, Paul D. Mitchell *et al.* 2009; Brookes and Barfoot 2013 a,b)。グリホサートと組み合わせ非グリホサート除草剤の使用を増やすこ

と (Culpepper, T.M. Webster *et al.* 2011; Prince, Shaw *et al.* 2012) は、ある地域内で抵抗性雑草群落が定着する前にその出現を防止または遅延させるために一般に推奨されている雑草防除法である (Norsworthy, Ward *et al.* 2012)。生産者が耕起および中耕の利用を増やすという傾向も一部にあるものの、地域は限定的であり、グリホサート耐性作物導入以来の不耕起を含む減耕起農法の採用で得られるメリットを継続していく方向性が取られている (CAST 2012)。作付けの前に深く耕やすようにという一部の研究者の助言に生産者が従った地域では、深い耕起により土壌流亡・養分流出が起これ、これを軽減するために被覆作物を栽培するなどの手段が取られている (Culpepper, T.M. Webster *et al.* 2011; CAST 2012)。

こうした多様な雑草防除プログラムを導入することにより、それまで順調に減っていた除草剤使用量が一部増加に転じた。これは、総合的な雑草防除プログラムにグリホサート以外の複数の除草剤を加え、雑草防除オプションの多様性を高める必要があるとする官民の雑草学研究者の意見に、農業生産者が従ったためである (Brookes and Barfoot 2013 b)。しかし、グリホサートを基本とした多様化した雑草防除システムは、総合的な雑草防除に必要な除草剤の数と量の点から見て、いまだに多くの状況下で非組換え作物に勝る利点を持っている。たとえば、非組換えテンサイ栽培において農業生産者は、雑草防除のために、最大4種類の除草剤を混合して2~5回散布している。遺伝子組換えグリホサート耐性テンサイの導入によって農業生産者は、グリホサート抵抗性雑草がない場合には4種の除草剤のかわりにグリホサートだけを散布することができる。また、グリホサート抵抗性雑草の出現した地域の場合は雑草防除に他の除草剤を添加するだけでよく、非組換え品種と比べれば実質的な除草剤の種類も量も削減できている。

米国では、グリホサート抵抗性雑草が出現する中、生産者は現在もグリホサート耐性作物により相当な経済利益を確保している (Brookes and

Barfoot 2013 a,b)。農業生産者がより多様な雑草防除プログラムを用いることにより雑草防除費用が増加した場合でも、グリホサート耐性ダイズの栽培による増収は農家生産者の経営に対するメリットとして実現している。たとえば、ダイズにおけるグリホサート抵抗性雑草の防除費用は地域と雑草の種類により1エーカーあたり7ドルから104ドルの範囲にあると推定される (Mueller, Mitchell *et al.* 2005 ; Carpenter and Gianessi 2010)。この高い方の数値は除草剤による防除ができないごく限られた面積の、手取り除草の費用が含まれていることによる。前述したように第二世代グリホサート耐性ダイズは2011年、収入を1ha当たり143.8ドル増やしたと推定されており、抵抗性雑草の出現があっても農業生産者はグリホサート耐性ダイズを栽培することで十分な利益を享受していることが認められる。また、グリホサート抵抗性雑草の出現後もグリホサート耐性作物のシェアは落ちておらず、これは農業生産者がその利点を認識し、今でも栽培の中心においていることを示している。

使用場面での管理責任体制 (スチュワードシップ)

除草剤抵抗性雑草に対する対策の鍵が厳格なスチュワードシッププログラムの策定と実施であることは広く認識されている。スチュワードシッププログラムには、(1)農業生産者および農業指導者の教育研修プログラムの実施、(2)除草剤抵抗性雑草の早期検知を目的としたモニタリングプログラムの実施、(3)最善の雑草防除法を確立するための基礎研究・応用研究の実施、(4)除草剤抵抗性雑草の発生対策としての新規のツールおよび方策の研究と開発が含まれる。米国の企業、大学の普及機関、政府機関は、農業生産者を対象とした教育普及活動に相当な時間を割いてきた。現在までの知見によれば、グリホサート耐性作物において、推奨された抵抗性雑草対策が成功してきている。この証拠として、グリホサート耐性トウモロコシ、ワタ、ダイズにおける雑草防除法多様化プログラムの導入は、非グリホサート除草剤の使用量増加が示すとおり、最近5~10年で大きく進

んでいる (Brookes and Barfoot 2013 b)。たとえば、モンサント・カンパニーの調査によれば、2005年から2012年の間、グリホサート耐性トウモロコシ、ダイズ、ワタにおいて非グリホサート除草剤の使用が25%から35%増加している (未発表)。これら3つのグリホサート耐性作物で、主に使用されているグリホサート以外の除草剤は、土壌処理効果のある発芽前処理除草剤あるいは作物の生育期間中にグリホサートに混合して散布する茎葉処理除草剤である。さらに、モンサント・カンパニーの調査によれば、農業生産者がこれらの多様化した雑草防除法のなかで、抵抗性雑草を経験した後もそれ以前と同じレベルでグリホサートを使用し続けているという事実は、抵抗性雑草を経験した後もグリホサートの使用になお価値を見出していることを示している (未発表)。グリホサート耐性作物における雑草防除多様化プログラムの導入は、特にダイズでさらに進める必要があるが、希望が持てる傾向がはっきりと認められることから、モンサント・カンパニーは業界や学会と力を合わせ、農業生産者への普及活動とスチュワードシッププログラムの研究開発に取り組んでいく方針である。

新しい除草剤耐性形質

新しい除草剤耐性作物は、生産者が雑草防除多様化プログラムに使用する除草剤のオプションを増やす観点から、今後も必要に応じて拡大を続けるであろう (Green 2011)。過去20年以上にわたり新しい作用機作を持った茎葉処理除草剤が商業的に発売されておらず、複数の除草剤に抵抗性を持つ雑草群落の発生が増えているため、既存の除草剤への抵抗性の出現を防止または遅延するには、特定の作物における雑草防除のオプションを増やす方法の開発が必須になりつつある (Duke 2011)。複数の除草剤オプション、すなわち、生育期全体にわたり混合剤の散布または体系散布として、またはローテーションとして組み合わせることができるオプションを持つことにより、新しい抵抗性雑草の出現を防止または遅延することが期待できる。また、作物に対する安全性を高める

バイオテクノロジーの利用によって、作物に対する選択性が十分でない除草剤にも実用化の道を開く可能性がある。

複数の新しい除草剤耐性形質が米国その他の地域で開発の過程にある。これらには、ジカンバおよび2,4-D除草剤に対する耐性の他に、ACCase阻害型、ALS阻害型、HPPD阻害型の除草剤耐性などである (Green 2011)。開発中の除草剤耐性形質の中でも、ジカンバおよび2,4-Dへの耐性は、商業化が間近である。これらの除草剤は多くの広葉雑草に効果を持ち、グリホサートやグルホシネートとの相性も良く、グリホサートやグルホシネート抵抗性広葉雑草を防除するうえで、グリホサートまたはグルホシネートとの併用に優れたオプションとなる。また、これらの除草剤の主な対象となる広葉雑草は、複数の除草剤に対する抵抗性の発現が最も多い雑草である (Heap 2012)。

複数の除草剤耐性掛け合わせ (スタック) 作物

新しい除草剤耐性形質の実用化に伴い、モンサント・カンパニーをはじめとする種子企業は、別の除草剤を雑草防除プログラムに組み入れる複数のオプションを提供するため、同じ品種やハイブリッドに複数の除草剤耐性形質を掛け合わせることを計画している。モデル化研究および抵抗性雑草対策の理論によれば、農業生産者がこうしたより多様化した雑草防除プログラムに移行することで、抵抗性雑草の発生リスクはどの除草剤の場合も小さくなることが示されている (Gressel and Segel 1990; Wrubel and Gressel 1994)。

結 論

除草剤耐性作物は生産者に多大なメリットをもたらしており、近代的な農業生産が環境に与える負荷を抑えながら、収量を向上させることに役立っている。除草剤抵抗性雑草は、農業生産者の生産性と雑草防除に影響を与えているが、農業生産者は多様化雑草防除プログラムの実践によってこれに対策を採っている。この多様化雑草防除プログラムには、異なった作用機作を持つ除草剤の使用や、適切な機械農法や栽培法との組み合わせ

などが取り入れられている。除草剤抵抗性雑草はあらゆる除草剤にとっての難題である。米国においては官民両セクターの協力により、農業生産者が抵抗性雑草発生の重大性を認識し、抵抗性雑草に対応できるようにするための対策が進められている。バイオテクノロジーはこれまでと同様に、今後も最善の多様化した雑草防除プログラムを実施できる新しいツールを、農業生産者に提供していくと考えられる。新しい除草剤耐性形質が導入されれば、同じ品種に複数の除草剤耐性形質を掛け合わせる事ができ、農業生産者が利用できるオプションがさらに広がると期待される。

参考文献

- Beckie, H. J. and X. Reboud 2009. Selecting for weed resistance: herbicide rotation and mixture. *Weed Technology* 23(3), 363-370.
- Beckie, H. J. 2011. Herbicide-resistant weed management: focus on glyphosate. *Pest Management Science* 67(9), 1037-1048.
- Borggaard, O. K. and A. L. Gimsing 2008. Fate of glyphosate in soil and the possibility of leaching to ground and surface waters: a review. *Pest Management Science* 64(4), 441-456.
- Brookes, G. and P. Barfoot 2005. GM crops: the global economic and environmental impact - the first nine years 1996-2004. *AgBioForum* 8(2/3), 187-196.
- Brookes, G. and P. Barfoot 2013 a. The global income and production effects of genetically modified (GM) crops 1996-2011. *GM Crops Food* 4(1), 74-83.
- Brookes, G. and P. Barfoot 2013 b. GM crops: global socio-economic and environmental impacts 1996-2011.
- Brookes, G. and P. Barfoot 2013 c. Key environmental impacts of global genetically modified (GM) crop use 1996-2011. *GM Crops and Food: Biotechnology in Agriculture and*

- the Food Chain 4(2), 0-1.
- Carpenter, J. and L. Gianessi 1999. Herbicide tolerant soybeans: why growers are adopting roundup ready varieties. *AgBioForum* 2(2),1-7.
- Carpenter, J. E. 2010. Peer-reviewed surveys indicate positive impact of commercialized GM crops. *Nat Biotechnol* 28(4), 319-321.
- Carpenter, J. E. 2011. Impact of GM crops on biodiversity. *GM Crops* 2(1), 7-23.
- Carpenter, J.E. and L.P. Gianessi 2010. Economic Impact of Glyphosate-Resistant Weeds. *Glyphosate Resistance in Crops and Weeds*, John Wiley & Sons, Inc,pp.297-312.
- CAST. 2012. Herbicide-resistant Weeds Threaten Soil conservation Gains: finding a Balance for Soil and Farm sustainability. CAST Issue Paper 49, from www.cast-science.org.
- Cerdeira, A. L. and S. O. Duke 2006. The current status and environmental impacts of glyphosate-resistant crops: a review. *J Environ. Qual.* 35(5), 1633-1658.
- Culpepper, A. Stanley, Alan C. York, Roger B. Batts, and Katherine M. Jennings. 2000. Weed Management in Glufosinate- and Glyphosate-Resistant Soybean (*Glycine max*). *Weed Technology* 14,77-88.
- Culpepper, A. S., T.M. Webster, *et al.* 2011. Glyphosate-resistant Palmer amaranth in the United States. *Glyphosate Resistance in Crops and Weeds*. V. K. Nandula. New Jersey, John Wiley and Sons, p.195.
- Diggle, A. J., P. B. Neve, and F. P. Smith 2003. Herbicides used in combination can reduce the probability of herbicide resistance in finite weed populations. *Weed Res.* 43,371-382.
- Duke, S. O. 2011. Why are there no new herbicide modes of action in recent years? Abstract. Weed Science Society of America Annual Meeting, Portland, Oregon.
- Duke, S. O. and S. B. Powles 2009. Glyphosate-resistant crops and weeds: now and in the future. *AgBioForum* 12(3/4), 346-357.
- Fernandez-Cornejo, J. and M. Caswell 2006. The First Decade of Genetically Engineered Crops in the United States. USDA, ERS Economic Information Bulletin (11).
- Fernandez-Cornejo, J., C. Hallahan, R. Nehring, S. Wechsler and A. Grube 2012. Conservation tillage, herbicide use, and genetically engineered crops in the United States: The case of soybeans. *AgBioForum* 15(3), 231-241.
- Fernandez-Cornejo, J., C. Hendricks, *et al.* 2005. Technology adoption and off-farm household income. *Journal of Agricultural and Applied Economics* 37(3), 549-564.
- Finger, R., N. El Benni, *et al.* 2011. A Meta Analysis on Farm-Level Costs and Benefits of GM Crops. *Sustainability* 3(5), 743-762.
- Gardner, J. G., R. F. Nehring, *et al.* 2009. Genetically modified crops and household labor savings in US crop production. *AgBioForum* 12(3/4), 303-312.
- Gianessi, L. and A. Williams 2011. Overlooking the Obvious: The Opportunity for Herbicides in Africa. *Outlooks on Pest Management* 22(5), 211-215.
- Gianessi, L. P. 2008. Economic impacts of glyphosate-resistant crops. *Pest Management Science* 64(4), 346-352.
- Green, J. 2011. Outlook on Weed Management in Herbicide-Resistant Crops: Need for Diversification. *Outlooks on Pest Management* – June 2011, from www.pestoutlook.com.
- Gressel, J. and L. A. Segel 1990. Modeling the Effectiveness of Herbicide Rotations and Mixtures as Strategies to Delay or Preclude Resistance. *Weed Technology* 4(1), 186-198.
- Heap, I. 2012. International survey of herbicide resistant weeds. Retrieved June 10, 2012, from <http://www.weedscience.org/in.asp>.

- Hurley, T. M., P.D.Mitchell and G.B. Frisvold 2009. Characteristics of herbicides and weed-management programs most important to corn, cotton, and soybean growers.
- Hurley, T. M., Paul D. Mitchell, *et al.* 2009. Effects of Weed-Resistance Concerns and Resistance-Management Practices on the Value of roundup Ready Crops. *Ag.Bio.Forum* 12(3&4), 291-302.
- James, C. 2012. "Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2012. ISAAA Brief No. 44.
- Lee, L., J. Ngim, *et al.* 2000. A first report of glyphosate-resistant goosegrass (*Eleusine indica* (L) Gaertn) in Malaysia. *Pest Management Science* 56(4), 336-339.
- Marra, M. C., N. E. Piggott, *et al.* 2004. The net benefits, including convenience, of Roundup Ready soybeans: results from a national survey. Raleigh, NSF Center for Integrated Pest Management.
- Mueller, T.C., P.D. Mitchell, *et al.* 2005. Proactive Versus Reactive Management of Glyphosate -Resistant or -Tolerant Weeds 1. *Weed Technology* 19(4), 924-933.
- Neve, P., A. J. Diggle, *et al.* 2003. Simulating evolution of glyphosate resistance in *Lolium rigidum* I: Population biology of a rare resistance trait. *Weed Research (Oxford)* 43(6),404-417.
- Neve, P., J. K. Norsworthy, *et al.* 2011a. Modeling glyphosate resistance management strategies for Palmer amaranth (*Amaranthus palmeri*) in cotton. *Weed Technology* 25(3),335-343.
- Neve, P., J. K. Norsworthy, *et al.* 2011 b. Modelling evolution and management of glyphosate resistance in *Amaranthus palmeri*. *Weed Research (Oxford)* 51(2), 99-112.
- Nolte, Scott A. and Bryan G. Young 2002. Efficacy and Economic Return on Investment for Conventional and Herbicide-Resistant soybean (*Glycine max*). *Weed Technology* 16,388-395.
- Norsworthy, J. K., S. M. Ward, *et al.* 2012. Reducing the risks of herbicide resistance: best management practices and recommendations. *Weed Science* 60(Sp1), 31-62.
- Owen, M. D. K., P. Pedersen, *et al.* 2010. Comparisons of genetically modified and non-genetically modified soybean cultivars and weed management systems. *Crop Science* 50(6), 2597-2604.
- Padgett, S. R., D. B. Re, *et al.* 1996. New weed control opportunities: Development of soybeans with a Roundup Ready gene. *Herbicide-Resistant Crops*. S. O. Duke. Boca Raton, CRC Press, 53-84.
- Piggott, N. E. and M. C. Marra 2008. Biotechnology adoption over time in the presence of non-pecuniary characteristics that directly affect utility: a derived demand approach. *Ag.Bio.Forum* 11(1), 58-70.
- PG Economics 2013. Global economics benefits of GM crops reach almost \$100 billion. Dorchester, UK, <http://www.pgeconomics.co.uk/page/35/> [Accessed June 6, 2014]
- Powles, S. B., D. F. Lorraine-Colwill, *et al.* 1998. Evolved resistance to glyphosate in rigid ryegrass (*Lolium rigidum*) in Australia. *Weed Science* 46(5), 604-607.
- Prince, J. M., D. R. Shaw, *et al.* 2012 a. Benchmark study: II A 2010 survey to assess grower awareness of and attitudes toward glyphosate resistance. *Weed Technology* 26(3),531-535.
- Prince, J. M., D. R. Shaw, *et al.* 2012 b. Benchmark study: III Survey on changing herbicide use patterns in glyphosate-resistant cropping systems. *Weed Technology*

- 26(3),536-542.
- Qaim, M. 2005. Agricultural Biotechnology Adoption in Developing Countries. *American Journal of Agricultural Economics* 87(5), 1317-1324.
- Qaim, M. and G. Traxler 2005. Roundup Ready soybeans in Argentina: farm level and aggregate welfare effects. *Agricultural Economics* 32(1), 73-86.
- Raven, P.H. 2010. Does the use of transgenic plants diminish or promote biodiversity? *New Biotechnology* 27(5), 528-533
- Reddy, Krishna N. and Kelly Whiting 2000. Weed Control and Economic Comparisons of Glyphosate-Resistant, Sulfonylurea-Tolerant, and Conventional Soybean (*Glycine max*) Systems. *Weed Technology* 14,204-211.
- Shaw, D. R. and C. S. Bray 2003. Foreign material and seed moisture in glyphosate-resistant and conventional soybean systems. *Weed Technology* 17(2), 389-393.
- Shipitalo, M. J., R. W. Malone, *et al.* 2008. Impact of glyphosate-tolerant soybean and glufosinate-tolerant corn production on herbicide losses in surface runoff. *J. Environ. Qual.* 37(2), 401-408.
- USDA, U. S. D. o. A. N. A. S. S. 1995, 2006. Agricultural Chemical Usage - Field Crops and Potatoes.
- Wrubel, R. P. and J. Gressel 1994. Are herbicide mixtures useful for delaying the rapid evolution of resistance? A case study. *Weed Technology* 8(3), 635-648.
- WSSA. 2012. Weed Science Society of America (WSSA) website. Retrieved Accessed June 2012, from <http://www.wssa.net>.