

雑草管理と遺伝子組換え作物

国立研究開発法人
農業環境技術研究所
研究コーディネータ

與語 靖洋

はじめに

国際連合食糧農業機関（FAO）によれば、2013年に72億人であった世界の人口は、開発途上国における爆発的増加によって、2050年には96億人（うち開発途上国は83億人）に到達するとされる。また、世界の栄養不足人口は、年々減少しているものの、2011～2013年には約8.4億人と推計され、その98%が開発途上国に集中しており、人口割合で約12%が栄養不足にあたる。また、FAOは、世界の食料消費が2050年までに2005～2007年に比べて60%増大すると推定している（Alexandratosら2012）。一方、耕作可能な耕地面積は年々減少し、1人当たりの耕地面積は1960年からほぼ半減している。

増え続ける人口の食糧確保のためには、単位面積当たりの収量増大や安定生産に加えて、軽労化や効率化も強

く求められる。農業生産においては、1950～60年代の“第一の緑の革命”に続き、2050年をターゲットにした“第二の緑の革命”が求められている。ここでは、乾燥、塩害、高温等の環境ストレスへの対応の他に、植物保護技術の革新的向上が重要なカギを握っており（日本学術会議2011）、その手段の1つに遺伝子組換え作物がある。

生物の多様性に関する条約（Convention on Biological Diversity, CBD）のバイオセーフティに関するカルタヘナ議定書（Cartagena Protocol on Biosafety, CPB）は、2000年モントリオールにおいて採択され、2003年に発効し、2014年までに167ヶ国と欧州連合（EU）が締結している。CPBが対象とするのは、生物多様性の保全と持続可能な利用に悪影響を及ぼす可能性のあるすべての遺伝子組換え生物および分類学上の科を越える細胞融合である。これらをCPBでは、Living Modified Organisms(LMO)

と総称している。CPBの締約国会議（COP-MOP）は、隔年でCBD締約国会議と同時開催されるが、Biosafety Clearing-House (BCH)において、LMOに関する情報交換や締約国の活動を支援している。

我が国では、CPBを実施するため、2003年に「遺伝子組換え生物等の使用等の規制による生物の多様性の確保に関する法律（カルタヘナ国内法）」が公布され、翌年施行された。LM作物に関する国内外の状況（小泉2015; 三石2013）や我が国における生物多様性影響評価（大澤2015; 下野2015）等については成書を参照いただくとして、ここでは、雑草管理の視点からLM作物を概観する（與語2004, 2013）。

1. 近年の雑草問題

農作物の栽培において、雑草管理は極めて重要な作業であるが、国内外の雑草管理において、近年様々な問題が発生している。

第一に除草剤抵抗性雑草である。リュブリアーナ宣言（2008）において、農業抵抗性病害虫・雑草の出現に対して警鐘が鳴らされた。その原因として、ヒトや環境への悪影響の観点から、農業登録が抹消または使用可能な場面が限定されたことが挙げられている。一方、商業栽培されている除草剤耐性LM作物では、適用可能な除草剤の作用点は限られている。また、マイナー作物では、一般に適用



図-1 遺伝子組換え大豆（米国）



図-2 カントリーエレベーター
(トウモロコシ, 米国)

除草剤は極めて少ない。何れの場合も、同一または作用点と同じ除草剤を連用することによって、抵抗性雑草の出現を助長するおそれがある。実際、除草剤抵抗性雑草は増加の一途をたどり、2015年5月現在、世界66ヶ国で、除草剤作用点の25中22に対して、246種が報告されている。この対処法として、異なる作用点を有する除草剤との混用、ローテーション散布、汚染を拡げないための管理(Hygiene)等が知られている。他には、除草剤以外の防除法との組み合わせによる管理、いわゆる総合的雑草管理(Integrated Weed Management, IWM)や総合的作物管理(Integrated Crop Management, ICM)がある。

第二に外来雑草である。我が国における外来雑草は1900年初頭から急激に増加し、現在1,600種は優に超えると言われている。我が国のような農産物輸入大国では、非意図的導入と意図的導入の両方で外来雑草が侵入・定着・蔓延するリスクがある。前者では飼料用種子、乾草、濃厚飼料等への雑草の混入が問題となる。一方、後者では景観植物、観賞用植物、被覆植物、緑化植物等があり、輸入した植物自身が雑草化する危険性がある(與語2005)。その対処法として、我が国への侵入、耕地への侵入、耕地における

蔓延および定着の防止がある。中でも、元から断つ意味で、我が国への侵入防止が最も有効であるものの、現行の法規制では実効性は乏しい。

第三に土壌侵食である。土壌侵食の大半は水食と風食であり、現在まで、世界の耕地面積の12%が、土壌侵食によって失われている。その原因として、耕起や化学肥料の多量投入による有機物の減少が挙げられるが、それに加えて、農業による土壌中生物相の減少や活動量の低下も考えられる。除草剤によって雑草を完全防除することも原因の一つであろう。結果として、団粒構造の崩壊や保水力の低下が起これ、土壌が崩れやすくなり、水や風による土壌侵食を助長すると考えられる。

2. 雑草管理の基本

雑草管理の基本といえば、「上農は草を見ずして草を取り、中農は草を見てから草を刈り、下農は草を見て草を取らず」という諺が思い浮かぶが、ここでは3つほど示す。

第一に、作物-雑草間の競合である。物理、生物、化学的な手法にかかわらず、作物の収量や品質に悪影響を及ぼさない程度に雑草との競合を抑えることが、雑草管理の基本である。LM作物の生物多様性影響評価においては、

「競合における優位性」、「有害物質の産生性」、および「交雑性」が評価項目の三本柱になっているが、耕地における雑草管理の観点からは、作物の雑草に対する「競合における優位性」が求められる。

このような雑草との競合における作物の優位性を、除草剤では「選択性」という。除草剤開発では、有機化学物質のデザイン(合成)と生物検定を組み合わせて、構造活性相関などの解析を進めながら選抜するが、生物検定の主たる目標がこの選択性である。除草剤の選択性機構は、その挙動に沿って、吸収・移行・(異物)代謝・作用点の違いによって成立している。既存除草剤の選択性は、大きな選択幅が期待できる解毒代謝と作用点親和性に依るものが多い。

植物には潜在的な作用点があり、1,000~3,000ヶ所あると言われているものの、既存除草剤では、約20種類の作用点に限定されている(松本2003; 與語2003)。その作用点の大半が単一部位(酵素)を阻害するものであるが、作用点が不明または複数の作用点が報告されている除草剤もある。一方、異物代謝については、一般に第I相反応(酸化、還元、加水分解等)と第II相反応(内因性物質との抱合)があり、ほとんどの場合、解毒(無毒化)され

る方向に進むものの、植物体内で活性化して、阻害作用を示す場合もある。

第二に、埋土種子管理である。雑草の埋土種子については、国内外で長い研究の歴史がある。我が国では、近年「埋土種子マニュアル（第2版）」（中央農業総合研究センター 2013）を発売した。また、「総合的雑草管理（IWM）マニュアル」（中央農業総合研究センター 2011）の中で、化学的雑草管理である除草剤に加えて、耕種的管理（作付体系や耕起等）や、生物的管理（カバークロープ等）を組合せた総合管理体系の重要性を述べている。ここでは、埋土種子の解析による雑草個体群の動態変化予測等に基づいて、IWMの適用性や安定性を評価し、実用的かつ持続的なIWM体系の提示を目指している。海外では、埋土種子管理の一つとして、Harvest Weed Seed Control, HWSC (Walsh *et al* 2013) も行われている。

第三に、作物の品質確保である。第一に示した各種競合による品質低下もその一つであるが、ここでは、収穫時の問題を取り上げる。作物の収穫時の雑草種子の混入については外来雑草について前述したが、国内でも起こりうる問題である。それ以外に、コンバイン収穫の際、青々として雑草が穀物とともに収穫され、収穫機の中で混ざることによって緑の絵の具のように穀物種子に付着することが考えられる。その対策として、収穫直前の枯凋剤（主に茎葉処理型の非選択性除草剤）処理がある。

3. 除草剤耐性 LM 作物

国際アグリ事業団 (ISAAA) によれば、現在商業栽培されている LM 作物の多くに除草剤耐性の形質が付与されている。我が国では、2015年3月現在、191のLM作物が第一種使用等の承認を受けているが、その大半が、海外で栽培されたLM作物の輸入認可を目的としているため、海外での動向をそのまま反映している。

商業栽培されている除草剤耐性 LM 作物のうち大半は、茎葉処理型非選択性除草剤に耐性を付与するものであり、殺草スペクトルが広い選択性を実現している。グリホサートは作用点である5-エノールピルピルシキミ酸-3-リン酸合成酵素 (EPSPS) を阻害することで、植物の生育を阻害する。本剤に耐性の LM 作物は、起源は異なるものの、除草剤に対する作用点の親和性を低下させた EPSPS 遺伝子を導入したものがほとんどである。なお、本剤の耐性機構として、他にも酸化還元酵素や N-アセチルトランスフェラーゼによる解毒代謝等がある。一方、グルホシネートの場合は、ホスフィノスリシン N-アセチルトランスフェラーゼによる解毒代謝によって耐性を高めている。

他にもプロモキシニル、スルホニルウレア系除草剤、2,4-D（アシルオキシアルカノエート系除草剤）、ジカンバの解毒代謝を高めることで耐性を付与した LM 作物、イソキサフルトール、イミダゾリノン系除草剤、スルホニル



写真-3 遺伝子組換えトウモロコシの畝間の様子（米国）

ウレア系除草剤、メソトリオンの作用点の親和性を低下させることで耐性を付与した LM 作物がある。また、除草剤耐性雑草の出現を抑制する方法として、複数の除草剤に耐性を有するスタック系統（異なる除草剤に耐性を付与した LM 作物を従来の交配育種の手法で育成したもの）も、海外で数多く商業栽培されている。

除草剤耐性 LM 作物には、様々なベネフィットとリスクがある（與語 1998, 2013）。

第一に、選択性である。前述のように、非選択性のグリホサートやグルホシネートの場合、作物に耐性を付与することで、単剤で幅広い殺草スペクトルを実現できる。そのため、異なる殺草スペクトルを有する除草剤や葉害軽減剤（セーフナー）を混合処理する必要がない。また、選択性除草剤の開発が難しいため、雑草管理に苦慮しているマイナー作物（地域特産作物）に除草剤耐性を付与すれば、雑草管理の労力軽減を図ることができる。さらに、隣接して栽培する作物に対して同じ除草剤に耐性の形質を付与すれば、ドリフトを気にすることなく、除草剤を処理できる。一方、前述のように、同一作用点を有する除草剤を連年使用すると、抵抗性雑草の発達が助長される危

険性がある。また、LM 作物が除草剤に対して極めて高い耐性を有する場合、薬剤の過剰散布による作物残留が懸念される。ただし、経済的視点で考えれば、農家が除草剤をむやみに過剰散布するとは考えにくい。

第二に、処理時期である。茎葉処理型（生育期処理）除草剤に対して耐性を有する LM 作物、特に非選択性除草剤では、処理時期を幅広く取ることができる。そのため、遅めに処理することで、体系処理の回数を削減できる。一方、処理時期が遅くなると、雑草の発生や耕地内の空間占有率の増加によって、作物との競合が高まり、作物の徒長による倒伏や、収量や品質の低下を招くおそれがある。

第三に、不耕起栽培である。茎葉処理除草剤耐性 LM 作物の場合、不耕起栽培が可能である。前述のように耕起は土壌侵食の原因の一つであることから、その防止につながる。さらに耕起作業が必要ないことで、労力やコストの削減を図ることができる。一方、不耕起栽培による土壌侵食防止効果を期待できない場合も想定される。また、根菜類は不耕起栽培を適用しにくく、地下に栄養繁殖器官を有する多年性雑草の占有率が高まることもある。

第四に、易分解性である。グリホサートやグルホシネート等は、環境（土壌）中で分解しやすいため、有効成分が長期残留しない。一方、土壌処理効果がないため、雑草の発生活消長が長いまたは作物の被度が低い場面では、後発の雑草に対して、対策を施す必要がある。

第五に、環境影響である。除草剤耐性 LM 作物を用いることで、除草剤使用量の削減、環境影響指数や温室効果ガスの減少等につながるといわれている（Brookesら 2013）。一方、LM 作物は、それ自身または導入形質が遺伝子流動することで生じる植物による生物多様性影響が懸念される。そのため、カルタヘナ国内法に則って影響を評価し、影響のおそれがないことが確認されて、初めて当該 LM 作物が第一種使用等の承認を受けることができる。また、承認を受けた LM 作物でも、交雑性等、必要に応じてモニタリングを課すこともある。他に、除草剤使用量の増加を示す報告もある（Benbrook 2012）。

4. 除草剤耐性以外の作物の形質

除草剤との組み合わせの必要がない技術（形質）を LM 作物に導入することも考えられる（興語 2004）が、ここでは簡単に触れるにとどめる。

第一に、アレロパシー（他感作用）である（Dukeら 2006; 藤井ら 2000）。アレロパシーは、ある生物が産生する物質（アレロケミカル）が、周辺生物の生育等にプラスまたはマイナスの影響を与える作用である。狭義ではあるが、一般にある植物が産生・放出する物質によって、他の植物の生長を抑えることをいう。当初は、自然界で観察された現象から、アレロケミカルの探索や、その量的形質

の品種間差異を調べていたが、最近では、アレロパシーの作用機構の解明や、LM 作物の作出まで発展しつつある（Sangeethaら 2015）。

第二に、植物の成長や形態である。“第二の緑の革命”とも関連するが、雑草との競合において、成長力の強化や形態の改変によって、雑草との競合において、作物を有利にすることが求められる。前者では、光合成能力が高い C4 植物の回路を C3 植物に導入することで、光合成能や物質生産能を向上させる取り組みがある。後者では、光・水分・養分の競合において、作物が有利に働くような形態の改変がある。例えば、被覆力を指標とした水稲の形態変化が、コナギ（小荒井 2004）やタイヌビエ（橘ら 2003）等の雑草の生育に及ぼす影響を要防除水準の観点から解析した研究がある。また、根の成長力や機能を改良することで、水分や養分の吸収力を高める研究もある。他には、とうもろこしで行われている循環選抜育種システムを、自殖性植物（イネ）に適用する取り組みもなされている（田中 2009）。具体的には、雄性不稔性にしたイネに対して、ゲノムシャッフリングを行う。成功すれば、水稲の生育を格段に高めることで、雑草に対する競合性を優位にすることも可能であろう。

これら除草剤耐性以外の技術は食用作物だけでなく、緑化植物やリビング・デッドマルチに導入することで、水田畦畔、果樹園の下の草、道路の法面、公園などでも、それぞれの目的に応じた

雑草管理の中で利用できる。

おわりに

除草剤を含む農薬も LM 作物も、賛否両論の二元論で議論されて久しい。賛成派は農業生産における重要性や安全性を主張し、反対派はヒトの健康や環境への悪影響を訴える。実際のところ、人工合成だけでなく天然を含むどのような物質も、人間の作りだした技術だけでなく自然界における様々な事象にも、良い面と悪い面がある。

レギュラトリーサイエンスという新しい研究分野がある。この考え方は、米国で 1970 年代から使用され、我が国では 1987 年に導入された（内山 2012）。何れも医薬品の分野であるが、日本農薬学会は、1994 年に農薬レギュラトリーサイエンス研究会を立ち上げている。この定義にはいくつかあり、類似の科学（表現）もあるが、私は、「ある課題に対する問題解決や要望に対して、直接・間接的な利害関係者が行う意思決定や行動を支援するための科学」と考えている。

除草剤や LM 作物においても、様々な利害関係者が存在し、それぞれに異なる問題や要望を持っているため、一つの社会で一つの選択肢を選定することは極めて難しい。一方、利害関係者間で、複数の選択肢を共存・共有する

可能性もある。作物生産において、国内外の食糧事情が変化中、幅広い利害関係者間でできるだけ情報を共有して、議論の場を築き上げることから始めるのが肝要であろう。

引用文献

- Alexandratos, N. and J. Bruinsma 2012. World agriculture towards 2030/2050, ESA Working Paper. No.12-03
- Benbrook, M.C. 2012. Environmental Science Europe 24, 1-13.
- Biosafety Clearing-House (URL) <http://bch.cbd.int/>
- Brookes, G. and P. Barfoot 2013. GM Crops and Food: Biotechnology in Agriculture and the Food Chain 3, 109-119
- 中央農業総合研究センター 2011. 総合的雑草管理 (IWM) マニュアル.
- 中央農業総合研究センター 2013. 麦作・大豆作・水稲作の難防除雑草 埋土種子調査マニュアル (第 2 版)
- Duke, O.S. *et al.* 2006. Novel Biotechnologies for Biocontrol Agent Enhancement and Management. Springer 75-86.
- 藤井義晴 2000. アレロパシー (多感物質の作用と利用). 農山漁村文化協会.
- 小荒井晃 2004. 中央農研研究報告 5, 59-102.
- 小泉望 2015. 国内外における遺伝子組換え植物の状況. 植調 48(12), 477-481.
- 松本宏 2003. 次世代の農薬開発. 日本農薬学会編, ソフトサイエンス社. pp.239-251.
- 三石誠司 2013. 共済総合研究. 67, 8-40. 日本学術会議農学委員会植物保護科学分科会

2011. 植物保護科学の展望—農業生産の向上と生物多様性—.
- 大倉利明 2010. 地球環境 15(1), 3-7.
- 大澤良 2015. 日本における遺伝子組換え植物の生物多様性影響評価の最近の動向. 植調 48(12), 483-491.
- 下野綾子 2015. 遺伝子組み換え植物の導入 遺伝子の拡散リスクと多様性影響評価. 植調 48(12), 493-499.
- Sangeetha C. and P. Baskar 2015. African J. of Agricultural Research 10, 1004-1015.
- 橘雅明・渡邊寛明 2003. 空間占有体積の異なる水稲品種の後発タイムピエに対する抑草力の差異. 雑草研究 (別), 56-57.
- 田中淳一 2009. 特許 4251375, WO/2009/133718.
- 内山 充 2012. Pharm. Tech. Japan 28(1), 6-7.
- Walsh, M. *et al.* 2013. Targeting Weed Seeds In-Crop: A New Weed Control Paradigm for Global Agriculture. Weed Technology 27, 431-436.
- 與語靖洋 1998. 遺伝子組換えによる作物保護の諸問題. 植物保護・環境シンポジウム, 第 4 回, 17-25.
- 與語靖洋 2003. 次世代の農薬開発. 日本農薬学会編, ソフトサイエンス社, 229-238.
- 與語靖洋 2004. 雑草管理における遺伝子工学の利用. 農業技術 59(2), 62-66.
- 與語靖洋 2005. 帰化雑草の種類と管理. 圃場と土壌 37(6), 25-32.
- 與語靖洋 2010. リグニン生合成系制御に関する生理生化学的研究. 雑草研究 55(2), 69-73.
- 與語靖洋 2013. 新しい植物保護への展望. 平成 25 年度学術会議公開シンポジウム 18-21.