

日本における遺伝子組換え作物の  
生物多様性影響評価法に関する考察

2016年1月

筑波大学大学院  
生命環境科学研究科  
生物圏資源科学専攻  
博士 (農学) 学位論文

中井 秀一

## 用語集

カルタヘナ法: 正式名称を「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」という。日本国内において、GM 生物の使用等について規制をし、生物多様性条約カルタヘナ議定書を適切に運用するための法律。

5

コモディティ作物: トウモロコシ、ダイズ、ワタ、セイヨウナタネなど世界の商品取引所で取引されている作物のこと。

ERA (Environmental Risk Assessment): 環境リスク評価の略。

10

FFP (Food, Feed, Processing): 食品、飼料、加工の略。GM 作物を栽培ではなく、食品、飼料又は加工用を目的として使用する際に用いられる。

15

ファミリアリティ (familiarity): 実際に GM 作物の使用を予定している環境下で、宿主植物の使用経験がどのくらいあるかという考え方で、環境リスク評価においては GM 作物の栽培が環境に与える影響を、従来作物 (Non-GM 作物) の栽培が環境に与える影響と比較して評価する。

20

GM (Genetically Modified) 作物: 遺伝子組換え作物ともいう。植物細胞や組織に外来遺伝子を導入し、形質転換した植物個体のこと。

隔離ほ場: GM 作物の栽培試験を行うために、一定の区画されたほ場のこと。日本においては他の部外者の立ち入りを防止するための囲い、標識、洗浄施設などの設備を備えていることが求められている。

25

兄弟系統: 導入遺伝子の植物ゲノム中での存在様式は同一であるが、その他の遺伝的背景が異なる系統のこと。

OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development): 経済協力開発機構の略で、  
5 本部はフランスのパリに置かれている。

Problem Formulation: 環境リスク評価における問題の定式化のこと。問題の定式化は評価エンドポイントの定義と概念モデル及び分析計画の構築からなるプロセス。GM 作物の環境  
10 リスク評価を Problem Formulation を用いて行うことで、闇雲にデータ収集するのではなく、  
評価のエンドポイントに沿って概念モデル (リスク仮説) を立て、分析計画を立案することが可能となる。

生物多様性影響評価: 生物の多様性に関する条約のバイオセーフティに関するカルタヘナ  
15 議定書 (カルタヘナ議定書) のもとで GM 作物のその国ごとの生物多様性に対する影響評  
価を行うこと。なお、生物多様性影響評価は日本のようにカルタヘナ議定書に批准した国  
のみで行われているが、米国のようにカルタヘナ議定書に批准していない国では環境リス  
ク評価を行っている。生物多様性影響評価と環境リスク評価は、いずれも国や地域に応じて  
環境中の保護すべき対象 (Protection Goal) を決定した上で、それらに対する GM 作物の  
影響を評価する。

20

WRA (Weed Risk Assessment): 雑草リスク評価の略。海外から持ち込まれる植物に対して、  
雑草化の恐れの有無を雑草性に関する質問に対する答えをスコア化して判断する手法。

## 目次

第1章 緒言.....	1
第2章 日本における隔離ほ場試験による GM トウモロコシの生物多様性 影響評価の実例.....	9
2-1 緒言.....	9
2-2 材料及び方法.....	12
2-2-1) 供試材料.....	12
2-2-2) 試験期間及び試験場所.....	13
2-2-3) 隔離ほ場試験の項目及び試験方法.....	13
2-3 結果.....	19
2-3-1) 形態及び生育の特性.....	19
2-3-2) 生育初期における低温耐性.....	20
2-3-3) 成体の越冬性.....	20
2-3-4) 花粉の稔性及びサイズ.....	21
2-3-5) 種子の生産量、脱粒性、休眠性及び発芽率.....	21
2-3-6) 有害物質の産生性.....	22
2-4 考察.....	23
2-4-1) 競合における優位性.....	23
2-4-2) 有害物質の産生性.....	26
2-4-3) 交雑性.....	28
第3章 栽培国で収集された隔離ほ場試験結果の、輸入国での生物多様性影 響評価を行うためのトランスポータビリティ (情報の可搬性) の検 討.....	48
3-1 緒言.....	48
3-2 GM 作物の隔離ほ場試験データの栽培国から輸入国へのトランスポータビリ ティを決定する要因.....	49



3-2-1)	隔離ほ場試験を実施する目的 .....	49
3-2-2)	宿主作物の雑草性 .....	51
3-2-3)	栽培国で得られた隔離ほ場試験データの信頼性 .....	54
3-3	考察 .....	60
第4章	総合考察 .....	69
4-1	日本における GM 作物の隔離ほ場試験の事例 .....	69
4-2	隔離ほ場試験データの栽培国から輸入国へのトランスポートビリティにつ いて .....	70
4-3	GM 作物の安全性を担保しながらも、より効率的で効果的な GM 作物の生物 多様性影響評価の実現を目指して .....	73
4-4	周辺の生態系に与えるプラスの影響も考慮した包括的な議論 .....	76
謝辞	.....	78
引用文献	.....	79

## 第1章 緒言

GM (Genetically Modified) 作物の全世界における栽培面積は、1996年から2014年までの間に、170万ヘクタールから1億8,150万ヘクタールを超えるまでに増加し、生産国数も6カ国から28カ国へと増加した (James, 2014)。現在商業栽培されている GM 作物の大部分はダイズ、トウモロコシ、ワタ、セイヨウナタネであるが、アルファルファ、テンサイ、パパイヤなど他の GM 作物も開発及び商品化されている (USDA Global Agricultural Information Network (GAIN), 2013)。

このように1996年に商業栽培が開始されて以来、GM作物が急速に世界中の農家に受け入れられた要因としては、主に収量の増加とコスト削減に伴う農家所得の向上並びに農薬使用量の減少や不耕起栽培による環境へのメリットが挙げられる。GM作物に由来して増加した農家所得は2013年では205億ドルで、18年間の累計では1,335億ドルに達すると報告されている (Brookes and Barfoot, 2015)。また、農薬使用量 (有効成分換算) については18年間の累計で550万トン削減されたと報告されている (Brookes and Barfoot, 2015)。さらに、農業由来の二酸化炭素の排出量も2,800万トン (自家用車1,240万台の年間排出量に相当) 削減されたと報告されている (Brookes and Barfoot, 2015)。この二酸化炭素の排出量の削減に貢献しているのは、主要栽培国で最も普及している害虫抵抗性と除草剤耐性の GM 作物である。害虫抵抗性の GM 作物については、殺虫剤の散布量が削減されることにより、スプレーヤーによる大規模な殺虫剤散布に伴う二酸化炭素の排出量を減らすことができる。除草剤耐性の GM 作物については、雑草防除を目的とした播種前の耕起を省略できることから、耕運機による大規模な耕起に伴う二酸化炭素の排出量が削減される。この不耕起栽培には、1. 土壌流亡や土壌中の肥料・農薬の河川流出の減少、2. 土壌中に閉じ込められた温室効果ガスの空気中への放出の抑制、3. 耕起によって空気中に蒸発される水分を保全することによる水資源の節約、といった環境や生態系への様々なメリットも確認されている (Brookes and Barfoot, 2015)。

上述したように GM 作物の普及が急速に進んでいる反面、現在大規模に商業栽培されている GM 作物の開発者は、バイエルクロップサイエンス、ダウ・ケミカル、デュポン、モンサント・カンパニー、シンジェンタといった大手 5 社に限られているといっても過言ではない。この理由としてよく挙げられるのは、GM 作物を開発する過程で必要な様々な遺伝子や開発技術に関する特許による制限である (Qaim, 2009)。しかし、それらの特許の多くは期限切れを迎えており、またその他の企業や国の研究機関も独自に遺伝子の探索や作出技術の研究を進めていることから、現時点では最も大きな要因ではないと考えられる。筆者が考える最も大きな要因は、開発した GM 作物の栽培又は GM 作物から収穫された穀物等を世界各国で流通させるために必要な安全性認可の取得に伴うコストの増大である。

現在、大規模に商業栽培されている GM 作物はトウモロコシ、ダイズ、ワタ、セイヨウナタネなどのように世界の穀物市場で大量に取引されているコモディティ作物である。実際に、日本は GM 作物の栽培国ではないが、世界最大の GM 作物の輸入国の一つである (USDA Global Agricultural Information Network (GAIN), 2013)。日本は世界中から 1 年間にトウモロコシを約 1,500 万トン、ダイズを約 300 万トン輸入しているが、輸入国における GM 作物の栽培割合から試算すると、このうち約 4 分の 3 が GM 作物であると考えられている。コモディティ作物のように、世界中の穀物市場で大量の取引が行われている作物を用いて GM 作物を開発すると多くのスケールメリットが期待できるのは事実であるが、その反面、GM 作物の栽培国に限らず、その収穫物が流通する全ての輸入国で安全性の認可を取得する必要がある。また GM 作物の使用用途にもよるが、一般的には国ごとに食品、飼料、環境に対する安全性認可の取得が求められており、この安全性の認可を取得するために必要なデータが国ごとに大きく異なるため、全ての国々で安全性認可を取得するためには膨大な資金が必要となる (Prado et al., 2014)。例えば、モンサント・カンパニーでは GM 作物の開発プロセスを遺伝子の探索 (Discovery) から商品準備 (フェーズ 4) までの五つのフェーズに分けており、各フェーズでの開発費を合計すると 1 系統の GM 作物を商品化するには約 1 億 3,600 万ドルの研究開発費がかかると試算している。そのうち、世界中の国々で安全性の認可を取得するためのデータを作成するフェーズ 3 では、全体の 30% に相当する



約 4,590 万ドルを費やしている (Prado et al., 2014)。このフェーズ 3 で費用が増大する要因の一つとしては、環境リスク評価において、コーデックスガイドラインのように食品安全性認可に必要なデータを定めた国際的な基準や指針が策定されていないため、求められる試験データが国ごとに大きく異なることが挙げられる。

5 日本において海外で栽培された GM 作物から収穫された穀物を食品・飼料用として輸入するためには、事前に食品と飼料に関する安全性の認可をそれぞれ厚生労働省と農林水産省から取得する必要がある (田部井, 2010)。また、その輸入される穀物が発芽可能な種子として輸入される場合は国内での栽培を意図していなくても、日本の環境に対する安全性の認可を農林水産省及び環境省から取得する必要がある (田部井, 2010)。

10 食品としての安全性は、1991 年から「組換え DNA 技術応用食品・食品添加物の安全性評価指針」に、2000 年からは「食品衛生法」に基づいた審査が行われた。さらに、2003 年に「食品安全基本法」が施行され、内閣府に食品安全委員会が発足したことに伴い、2003 年 7 月 1 日以降、遺伝子組換え食品の安全性審査は食品安全委員会により行われている (田部井, 2010)。

15 飼料としての安全性は、農林水産省の所管する「組換え体利用飼料の安全性評価指針」により確認されていたが、2003 年から「飼料の安全性の確保および品質の改善に関する法律」に基づいた安全性確認が行われている (田部井, 2010)。

環境に対する安全性は、1989 年 4 月からは農林水産省の「農林水産分野等における組換え体の利用のための指針」により確認されてきたが、2004 年 2 月 18 日に本指針は廃止  
20 された。その後、2004 年 2 月 19 日より、日本において「生物の多様性に関する条約のバイオセーフティに関するカルタヘナ議定書 (カルタヘナ議定書)」の効力が正式に施行されたことに伴い、「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 (カルタヘナ法)」のもとで、GM 作物の日本の生物多様性に対する影響評価が行われるようになった (田部井, 2010)。なお、生物多様性影響評価は日本のようにカルタヘナ議定  
25 書に批准した国のみで行われているが、米国のようにカルタヘナ議定書に批准していない国では環境リスク評価を行っている。生物多様性影響評価と環境リスク評価は、いずれも

国や地域に応じて環境中の保護すべき対象 (Protection Goal) を決定した上で、それらに対する GM 作物の影響を評価する (Chandler and Dunwell, 2008; Lu, 2008; 日本版バイオセーフティクリアリングハウス, 2015b)。

5 日本における食品、飼料、環境の安全性認可を取得するためのプロセスやその際に要求されるデータは、それぞれの法制度が整備されて以降、一部を除いて大きな改正は行われていない。同様に、他の国々においても GM 作物の急速な普及にもかかわらず、GM 作物の商業栽培が開始された 1996 年当時と比べて求められる試験データはほとんど変化していない。

10 以上のように GM 作物の商業栽培が急速に進んでいるにもかかわらず、一部の資金力のある企業のみが GM 作物を商品化している理由の一つは、GM 作物の安全性認可の取得に伴う膨大な開発コストにあると考えられた。

筆者は 2001 年に日本モンサント株式会社に入社以来、現在に至るまで一貫して上述した GM 作物の日本国内での安全性の認可を取得する業務に従事してきた。本論文では、筆者の 15 年間の経験と、これまでに蓄積されてきた知見及び科学的根拠に基づいて、2004 年に施行されてから 12 年が経過しようとしているカルタヘナ法のもとでの生物多様性影響評価法に対して提言を行う。効率的で効果的な GM 作物の生物多様性影響評価を行うことで、その安全性を十分に担保しながらも、財政的な余裕の無い研究機関や、民間企業も積極的に GM 作物の研究開発に取り組めると考える。

筆者が考える日本における GM 作物の生物多様性影響評価について改善が求められる点としては、1. GM 作物の環境への暴露量 (エクスポージャー) を考慮した評価、2. 導入遺伝子や宿主作物の蓄積された知見 (ファミリアリティ) に基づく評価、3. 栽培国から輸入国への隔離ほ場試験結果のトランスポータビリティ (情報の可搬性) 等が挙げられる。

一つ目の GM 作物の環境への暴露量 (エクスポージャー) は、GM 作物の栽培国と輸入



国とで使用が大きく異なる。日本においては、栽培される予定がなく、食品・飼料・加工 (Food、Feed、Processing: FFP) にのみ利用する目的で輸入される場合にも、一般ほ場での栽培を目的する場合と同様に、日本国内の隔離ほ場試験の実施が求められている (興語, 2010)。さらに、国内で商業栽培が行われているトウモロコシやダイズ等の作物に関しては、

5 栽培用種子への GM 作物の非意図的な微量混入を考慮して、たとえ日本国内で商業栽培を行う計画が無くても、栽培を含めた承認が求められている (大澤・下野, 2012)。一般的に GM 作物を国内で商業栽培する場合と、食品・飼料・加工 (FFP) のみに利用する目的で輸入する場合は、その GM 作物の環境への暴露量は大きく異なる。また、国内での商業栽培用の種子に非意図的に混入したとしても、意図的に国内の一般ほ場で栽培する場合の暴露量よりは著しく低いことは明白である。その一方で、これまでにない適応度を大きく向上させた GM 作物の野外への放出における生物多様性への影響は、有害な化学物質の放出などに比べると不確実要素が多いとの懸念もある (下野, 2015)。例えば、適応度を大きく向上させることにより、GM 作物そのものが農耕地以外で繁殖して拡大するようになれば、たとえ少数の個体の放出であっても、その作物が増殖することにより時間と共に影響が拡大するといった事象も考えられる。本論文ではこれらの懸念も念頭に置いた上で GM 作物の環境への暴露量を考慮した評価について、第 2 章及び第 3 章の考察で述べる。

10

15

二つ目の導入遺伝子や宿主作物の蓄積された知見 (ファミリーアリティ) に関しては、現在までにカルタヘナ法のもとでの生物多様性影響評価が終了し、日本において栽培地を限定せず栽培できるか、または日本への輸入が可能な GM 作物は、隔離ほ場試験を求められないスタック系統を除くと、2015 年 12 月の時点で既に 9 作物、77 系統に達している。その内訳はアルファルファ 3 系統、カーネーション 8 系統、セイヨウナタネ 9 系統、ダイズ 15 系統、テンサイ 1 系統、トウモロコシ 24 系統、バラ 2 系統、パパイヤ 1 系統、ワタ 14 系統の全 9 作物種である (農林水産省, 2015)。このように知見が蓄積されつつある状況でありながら、現時点では全ての GM 作物に対して同様のデータが求められており、トウモロコシのように長期間の使用経験がある宿主作物に既に評価された経験のある遺伝子を導

20

25

入した場合も例外ではない。

本論文では、第2章で日本モンサント株式会社が過去に隔離ほ場試験を行い、既にカルタヘナ法に基づく生物多様性影響評価を終え栽培及び食品・飼料・加工 (FFP) を目的とした使用が承認された GM トウモロコシ 11 系統の中から、主要栽培国で最も広く普及している形質である除草剤耐性と害虫抵抗性 (James, 2014) の形質を持つ MON88017 系統 (日本モンサント株式会社, 2006) と MON89034 系統 (日本モンサント株式会社, 2008) に加えて、近年開発の進んでいる栄養改変の形質を持つ LY038 系統 (日本モンサント株式会社, 2007) 及び乾燥ストレス耐性の形質を持つ MON87460 系統 (日本モンサント株式会社, 2012) の計 4 系統の GM トウモロコシ系統を選び、これら 4 系統の隔離ほ場試験の結果を示した。これらの隔離ほ場試験には、GM トウモロコシと対照の Non-GM トウモロコシが供試され、生物多様性影響評価に用いるデータが収集されているが、その詳細についてはこれまで社外秘として一般に公開されていなかったものである。したがって、トウモロコシに限ってではあるが、隔離ほ場試験において収集された情報を明らかにし、GM トウモロコシの生物多様性影響評価の実例を報告することで、日本における導入遺伝子や宿主作物の蓄積された知見 (ファミリー) に基づく生物多様性影響評価の実施に貢献することを目的とした。

なお、環境リスク評価におけるファミリーとは、GM 作物の栽培が環境に与える影響を、従来作物 (Non-GM 作物) の栽培が環境に与える影響と比較して評価するという概念である (Nickson and Horak, 2006; OECD, 1993)。例えば、隔離ほ場試験の結果、仮に対照の Non-GM トウモロコシとの間に統計学的有意差が認められた場合でも、有意差の認められた項目の値が、異なる遺伝的背景を持つ複数の Non-GM トウモロコシの値の範囲内であれば、その差異による影響は Non-GM トウモロコシが環境に与える影響を超えるものではないと判断できる (Horak et al., 2014)。しかし、日本における隔離ほ場試験は米国などの栽培国と比べて栽培面積に限りがあるため、各試験ほ場で同時に複数の従来作物 (Non-GM 作物) を栽培して種内品種間変動の範囲に関するデータを得ることが困難である。そこで、本章では上述した 4 系統の GM トウモロコシの隔離ほ場試験の結果に加えて、過去に日本



モンサント株式会社が隔離ほ場試験を実施した GM トウモロコシ 11 系統 [DLL25 系統 (1998 年)、NK603 系統 (2000 年)、MON863 系統 (2000 年)、MON810 系統 (1996 年、2001 年)、MON88001 系統 (2002 年)、MON88012 系統 (2002 年)、MON88017 系統 (2002 年)、LY038 系統 (2004 年)、MON89034 系統 (2006 年)、MON87460 系統 (2010 年)、MON87427 系統 (2010 年)] の隔離ほ場試験において (表 2-1)、対照として用いられた Non-GM トウモロコシの形態及び生育特性並びに種子の生産量に関する評価項目の調査結果に基づく平均値の最小値と最大値を提示した。これらの平均値の最小値と最大値の範囲は、日本の環境におけるトウモロコシの種内品種間変動の範囲の一つとして考えることができる。

10 三つ目の栽培国から輸入国への隔離ほ場試験結果のトランスポータビリティについては、日本や中国のように栽培を目的としない GM 作物に対しても国内でのほ場試験を求めている国において特に検討が必要である。現在、栽培ではなく食品・飼料・加工 (FFP) 用途のみを目的として輸入される GM 作物に対して国内での隔離ほ場試験を求めているのは日本と中国のみである。EU は大量の GM ダイズやセイヨウナタネを食品・飼料・加工 (FFP) 用途として主にブラジルやカナダから輸入しているが、栽培を目的としていない場合は、栽培国において得られた隔離ほ場試験の結果を用いてこれらの GM 作物の環境リスク評価を行っている (EFSA Panel on Genetically Modified Organisms (GMO), 2010)。同様に韓国も GM 作物を食品・飼料・加工 (FFP) 用途を目的として輸入する場合は、栽培国の隔離ほ場試験の結果を用いてこれらの GM 作物の環境リスク評価を行っている (Rural Development Administration (RDA), 2014)。そこで、第 3 章では、第 2 章で示した GM 作物の輸入国である日本における GM トウモロコシの隔離ほ場試験の結果と、栽培国である米国における隔離ほ場試験の結果に基づく評価方法を比較しながら、栽培国で得られた隔離ほ場試験の結果に基づき輸入国での生物多様性影響評価を行うためのトランスポータビリティについて検討する。

25

総合考察として第 4 章では、第 2 章でまとめた日本での GM トウモロコシの隔離ほ場試

5 験に基づく生物多様性影響評価から蓄積された知見と、第3章で検討した栽培国で得られた隔離ほ場試験結果の輸入国へのトランスポータビリティの科学的根拠に基づいて、施行以来12年を経とうとしているカルタヘナ法を再考し、日本における生物多様性影響評価のあり方について考察した。その結論として、日本に交雑種が存在せず、雑草性が極めて低い作物であるトウモロコシ及びワタについては、導入遺伝子の形質にかかわらず、栽培国で取得された隔離ほ場試験の結果を用いて、日本における生物多様性影響評価を行うことを、日本における生物多様性影響評価の効率的で効果的な改善案の一つとして提言した。

10 さらに将来的に検討し得る生物多様性影響評価のあり方として、GM作物のリスクのみに焦点を当てる現状の評価ではなく、冒頭で述べたGM作物を栽培することにより周辺環境や生態系に与えるプラスの影響についてもしっかりと認識した上で行う総合的な評価についても言及した。

## 第2章 日本における隔離ほ場試験による GM トウモロコシの生物多様性影響評価の実例

### 2-1 緒言

日本における GM 作物の生物多様性影響評価は、「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 (カルタヘナ法)」に基づき行なわれている。現在、海外で栽培された GM 作物の収穫種子を食品・飼料・加工 (FFP) 用として日本で利用する場合は、当該 GM 作物を日本において栽培する予定がない場合であっても、国内での隔離ほ場試験の結果に基づく生物多様性影響評価が求められている (田部井, 2010)。国内での隔離ほ場試験が必要な理由として、與後 (2010) は GM 作物の形態・生育特性は、土壤、気象、近縁野生種の種類など生育環境により変化することは否定できないためであるとしている。一方で、乾燥耐性を夏作物に導入した場合には、モンスーン気候である日本においては優位性が発揮されず、競合における優位性が現れない可能性があることを例に挙げている。すなわち、付与された形質が日本の環境下でどの程度発現されるかを知ることは、生物多様性影響評価に必須であることを示している。導入形質によっては、後述する競合における優位性、有害物質の産生性、交雑性のいずれも大きな変動があるとは想定できないこともあるが、海外で開発された GM 作物の形質が日本の環境下で評価されることはなかったため、申請者が評価書を作成するためにも、また、生物多様性影響評価検討委員会がその評価書を審議するためにも、隔離ほ場試験は必要不可欠なステップであると考えられている。

その一方で、現在までにカルタヘナ法による生物多様性影響評価が終了し、日本において栽培地を限定せずに栽培できるか、または日本へコモディティとしての輸入が可能な GM 作物は、隔離ほ場試験を求められないスタック系統を除くと、2015 年 12 月の時点で、既に 9 作物、77 系統に達している。その内訳は、アルファルファ 3 系統、カーネーション 8 系統、セイヨウナタネ 9 系統、ダイズ 15 系統、テンサイ 1 系統、トウモロコシ 24 系統、バラ 2 系統、パパイヤ 1 系統、ワタ 14 系統であり、トウモロコシが 3 分の 1 を占める (農林水産省, 2015)。



本章では日本モンサント株式会社が過去に隔離ほ場試験を行った 11 系統の GM トウモロコシの中から、主要栽培国で最も広く普及している形質である除草剤耐性と害虫抵抗性 (James, 2014) の形質を持つ MON88017 系統 (日本モンサント株式会社, 2006) と MON89034 系統 (日本モンサント株式会社, 2008) に加えて、近年開発の進んでいる栄養改変の形質を持つ LY038 系統 (日本モンサント株式会社, 2007) 及び乾燥ストレス耐性の形質を持つ MON87460 系統 (日本モンサント株式会社, 2012) の計 4 系統の GM トウモロコシ系統を選び (表 2-1)、これら 4 系統の隔離ほ場試験の結果を示した。

MON88017 系統では、改変 CP4 EPSPS 蛋白質を発現させることで除草剤グリホサートに対する耐性が付与され、Bt 蛋白質である改変 Cry3Bb1 蛋白質を発現させることでコーンルートワーム (corn rootworm: Coleoptera, *Diabrotica* sp.) に対する抵抗性が付与されている。MON89034 系統では、Bt 蛋白質である Cry1A.105 蛋白質及び改変 Cry2Ab2 蛋白質を発現させることで、ヨーロッパアワノメイガ (*Ostrinia nubilalis*) などチョウ目害虫に対する抵抗性を付与している。トウモロコシ中で、Cry1A.105 蛋白質と改変 Cry2Ab2 蛋白質を同時に発現させることにより、幅広いチョウ目昆虫種を防除でき、抵抗性害虫の発生するリスクを軽減することができる。LY038 系統は、トウモロコシゲノム中に *cordapA* 遺伝子を導入することにより作出された。トウモロコシ由来の G1b1 プロモーターにより、*Corynebacterium glutamicum* 由来のジヒドロジピコリン酸合成酵素 (cDHDPS) を主に胚中で発現させることで、リシン含量を高めている。MON87460 系統では、*Bacillus subtilis* 由来の導入遺伝子がコードする低温ショック蛋白質 B (CSPB) が発現する。細菌中で CSPB はストレス条件下で翻訳不可能な二次構造を形成している RNA に結合し、その二次構造を解消することで RNA の安定性を維持し、その結果として細胞の正常な働きをサポートしている。改変 CSPB が発現することにより、MON87460 系統は土壤水分が制限された条件下でも、対照の Non-GM トウモロコシと比較して収量の損失をある程度抑えることが可能となる (Monsanto Company, 2009)。

なお、日本モンサント株式会社が既にカルタヘナ法に基づく生物多様性影響評価を終えている 11 系統の GM トウモロコシの中から、上述した 4 系統を選んだ理由は、この 4 系

統に含まれる形質が残りの 7 系統に含まれる形質をほぼ網羅しているためである。特に MON88017 系統に含まれる除草剤グリホサート耐性とコウチュウ目害虫抵抗性の形質、及び MON89034 系統に含まれるチョウ目害虫抵抗性の形質は、北米を中心に世界 17 カ国で栽培されている GM トウモロコシの大部分を占めている (James, 2014)。

- 5 隔離ほ場試験における調査項目は、「農林水産大臣がその生産又は流通を所管する遺伝子組換え植物に係る第一種使用規程の承認の申請について (通知)」(農林水産省, 2007) に詳細が記載されている。この隔離ほ場試験で収集された情報等を用いて、GM 作物の日本における生物多様性影響評価が行われている。この GM 作物の生物多様性影響は、野生植物と栄養分、日照、生育場所等の資源を巡って競合し、それらの生育に支障を及ぼす性質
- 10 である「競合における優位性」、野生動植物又は微生物 (以下「野生動植物等」という) の生息又は生育に支障を及ぼす物質を産生する性質である「有害物質の産生性」、そして近縁の野生植物と交雑し、法が対象とする技術により移入された核酸をそれらに伝達する性質である「交雑性」について評価されている (田部井, 2010; 與後, 2010)。

本章では、上述した 4 系統の GM トウモロコシについて、隔離ほ場試験において収集さ

15 れた情報を明らかにし、日本における GM 作物の生物多様性影響評価の実例を報告する。また、得られた結果に基づいて、トウモロコシに限ってであるが、隔離ほ場試験の在り方と当該試験における調査項目の必要性等について論議し、導入形質を考慮した今後の隔離ほ場試験の在り方について考察する。なお、本章で使用する生物多様性影響評価の概要は

20 日本版バイオセーフティクリアリングハウス (J-BCH) 中の概要書に記載されているが (日本版バイオセーフティクリアリングハウス, 2015a)、詳細についてはこれまで社外秘として一般に公開されていなかったものである。また、本章ではこれら 4 系統の GM トウモロコシの導入遺伝子により付与された意図的な形質に関する生物多様性影響評価については触れていないが、これらの具体的な評価内容は J-BCH 中の概要書に記載されている (日本版バイオセーフティクリアリングハウス, 2015a)。



## 2-2 材料及び方法

### 2-2-1) 供試材料

供試系統は、除草剤グリホサート耐性及びコウチュウ目害虫抵抗性トウモロコシ MON88017 系統、高リシントウモロコシ LY038 系統、チョウ目害虫抵抗性トウモロコシ MON89034 系統及び乾燥耐性トウモロコシ MON87460 系統の遺伝子導入された初期世代に対して、複数の Non-GM 栽培品種を掛け合わせるにより作出した F<sub>1</sub> 雑種を供試した (表 2-1)。また、対照の Non-GM トウモロコシの F<sub>1</sub> 雑種は、組換え系統の F<sub>1</sub> 雑種と遺伝的な背景がほぼ同等となるように作出されている。これらはいずれもデント種である。なお、LY038 系統の対照の Non-GM トウモロコシには、LY038 系統の後代 F<sub>4</sub> 世代 (生物多様性影響評価書においては BC<sub>0</sub>F<sub>4</sub> と記述) における分離によって得られた Non-GM トウモロコシに、LY038 系統に掛け合わせた自殖系統と同じ系統を交配して得られた F<sub>1</sub> 雑種を用いた (以下 Null 型トウモロコシとする)。この Null 型トウモロコシに導入遺伝子が残存していないことは、サザンブロット分析及び PCR 分析により確認した (データ未掲載)。

また、MON88017 系統と LY038 系統については、それぞれ異なる二つの F<sub>1</sub> 雑種が隔離ほ場試験に供試されているが、この理由はこれら 2 系統の隔離ほ場試験を行った 2001 年と 2004 年は、新たに評価される GM 系統について二つ以上の異なる遺伝的背景をもつ F<sub>1</sub> 雑種品種を供試することが、農林水産省より求められていたからである。この理由としては、当時はたとえ同じ GM 系統であったとしても様々な品種と交配をすることにより、兄弟系統間で何らかの非意図的な変化が起こる可能性を懸念したためと考えられる。なお、2006 年以降は、導入遺伝子の兄弟系統間での安定性に関する知見が担保されたことを理由に二つ以上の異なる遺伝的背景をもつ F<sub>1</sub> 雑種品種を隔離ほ場試験に供試する必要性はないものと変更された。

さらに、本章では過去に実施した GM トウモロコシ 11 系統 [DLL25 系統 (1998 年)、NK603 系統 (2000 年)、MON863 系統 (2000 年)、MON810 系統 (1996 年、2001 年)、MON88001 系統 (2002 年)、MON88012 系統 (2002 年)、MON88017 系統 (2002 年)、LY038

系統 (2004 年)、MON89034 系統 (2006 年)、MON87460 系統 (2010 年)、MON87427 系統 (2010 年)] の隔離ほ場試験において (表 2-1)、対照として用いられた Non-GM トウモロコシの形態及び生育の特性並びに種子の生産量に関する評価項目の調査結果に基づく平均値の最小値と最大値を提示した。

- 5        なお、各 GM トウモロコシ系統中の導入遺伝子の詳細な作用機序は、日本版バイオセーフティクリアリングハウス (J-BCH) に掲載されている概要書に記載されている (日本版バイオセーフティクリアリングハウス, 2015a)。

#### 2-2-2) 試験期間及び試験場所

- 10        MON88017 系統、LY038 系統、MON89034 系統及び MON87460 系統の隔離ほ場試験は全て日本モンサント株式会社河内研究農場 (茨城県稲敷郡河内町) 内の隔離ほ場でそれぞれ 2001 年、2004 年、2006 年及び 2010 年に行われた。

#### 2-2-3) 隔離ほ場試験の項目及び試験方法

- 15        形態及び生育の特性 :

形態及び生育の特性調査は MON87460 系統を除き、1 区 3 反復で行った。MON87460 系統は 1 区 4 反復とした。1 区は 3 または 4 条からなり、条間は全て 1 m、株間は 20 cm で 1 条 15 株とした。

- 20        同一条件で栽培された GM トウモロコシ及び対照の Non-GM トウモロコシについて、登録出願品種審査要領に基づく農林水産植物種類別審査基準「とうもろこし種審査基準」(農林水産省, 2014a) を参考に作成した形態及び生育の特性の評価項目と、その定義 (表 2-2) に基づき評価を行った。形態及び生育の特性に関する評価項目は、発芽揃い (月日)、発芽株数 (MON89034 系統のみ)、発芽率 (%)、雄穂抽出期 (月日)、絹糸抽出期 (月日)、  
25        稈長 (cm)、着雌穂高 (cm)、分けつ数、草型、成熟期 (月日)、収穫期の地上部重 (kg)、粒型、粒色である。発芽揃い (月日)、発芽株数 (MON89034 系統のみ)、発芽率 (%) は

区ごとに調査し、雄穂抽出期 (月日)、絹糸抽出期 (月日) は全反復全ての個体を調査した。成熟期 (月日) は各反復から無作為に抽出した数個体を調査した。粒型、粒色は無作為に抽出した収穫種子の外観を目視観察した。稈長 (cm)、着雌穂高 (cm)、分けつ数、草型、収穫期の地上部重 (kg) は、MON87460 系統を除き、各反復につき 5 個体を調査した。MON87460 系統については、各反復の中央 2 条のうち 10 個体を調査した。

5 施肥は基肥として高度化成肥料 (N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=8:9:7) を 100 kg/10 a で施用し、その後硫酸を 15 kg/10 a で追肥した。除草剤は播種後に土壌処理剤 (ラッソー/ゲザプリム) をほ場全面に散布した。また、出穂前と絹糸抽出期にアワノメイガ防除のためにデナポン粒剤、成熟期にアブラムシの防除のためにスミチオン剤散布、成熟期に黒穂病の防除のためにベンレート剤散布を行った。

生育初期における低温耐性 :

GM トウモロコシ及び対照の Non-GM トウモロコシを閉鎖系温室内 (最低温度 20°C) で第 3~4 葉期になるまで 1/2000a ワグネルポットごとに 5 個体を生育させ、3 反復とした。第 3~4 葉期になるまで生育させた後、5°C (12 時間日長) に設定した人工気象室に移した後に生育状況の調査を行った。なお、MON87460 系統については、モンサント・カンパニー (米国) の人工気象室において行ったため、本章では報告しない。

成体の越冬性 :

20 収穫期あるいは冬期の GM トウモロコシ及び対照の Non-GM トウモロコシの生育状況を目視により比較することで成体の越冬性の有無について調査を行った。

花粉の稔性及びサイズ :

25 穂が開帳した GM トウモロコシ及び対照の Non-GM トウモロコシから採取した花粉をヨウ素ヨードカリ溶液で染色し、花粉の稔性及びサイズを比較した。なお、各系統のサンプリング方法は以下に示した。



MON88017 系統: 導入遺伝子発現確認区において、穂が開帳している 5 個体を反復ごとに無作為に選び、花粉を採取した。

5 LY038 系統: 形態及び生育特性調査区において、穂が開帳している 3 個体を反復ごとに無作為に選び、花粉を採取した。

MON89034 系統: 形態及び生育特性調査区において、穂が開帳している 15 個体を反復ごとに無作為に選び、花粉を採取した。

10

MON87460 系統: 形態及び生育特性調査区において、穂が開帳している 3 個体を反復ごとに無作為に選び、花粉を採取した。

種子の生産量、脱粒性、休眠性及び発芽率 :

15 種子の生産量 :

形態及び生育特性調査区で栽培された GM トウモロコシ及び対照の Non-GM トウモロコシについて、種子の生産量に関連する項目として、有効雌穂数、雌穂長 (cm)、雌穂径 (cm)、粒列数、一穂着粒数、一列粒数 (MON87460 系統を除く)、百粒重 (g) を調査した (表 2-3)。MON87460 系統を除き、各反復につき 5 個体を調査した。MON87460

20 系統については、各反復の中央 2 条のうち 10 個体を調査した。

脱粒性 :

形態及び生育特性調査区で栽培された GM トウモロコシ及び対照の Non-GM トウモロコシを収穫時に目視で苞に包まれているか否か、苞を取り除いた際に脱粒するか及び

25 脱粒の程度を観察した。なお、MON88017 系統及び LY038 系統については、本調査を行っていない。

休眠性及び発芽率：

形態及び生育特性調査区で栽培された GM トウモロコシ及び対照の Non-GM トウモロコシの収穫種子を反復ごとにバルクにし、MON88017 系統と LY038 系統の場合は反復当たり 30 粒、3 反復、MON89034 系統では 60 粒、3 反復、そして MON87460 系統では 50 粒、4 反復で発芽率を調査した。

有害物質の産生性：

有害物質の産生性を評価するために、以下に示す後作試験、土壌微生物相試験及び鋤込み試験を行った。

後作試験：

収穫時に形態及び生育特性調査区の各反復ごとに中央 2 条の株間から任意の 5 箇所にて、土壌サンプリングボーラーを用いて、約 20 cm の深度で土壌を採取した (表層 3 ~ 5 cm は除く)。採取した土壌 500 g を育苗用ポット (直径 10.5 cm, 高さ 9.0 cm) に詰めて高度化成肥料 (N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=8:9:7) を混和した後に、検定植物であるハツカダイコン (MON88017 系統及び LY038 系統では品種「アイシクル」、MON89034 系統及び MON87460 系統では品種「フレンチブラックファースト」) の種子を播種し、温室で発芽率 (MON89034 系統は発芽株数も含む) を調査した。その後、播種日から 25 ~ 38 日目に収穫し、その生体重 (MON87460 系統を除く)、乾物重 (MON88017 系統及び MON89034 系統を除く)、並びに草丈 (MON88017 系統及び LY038 系統を除く) を調査した。なお、各系統のサンプリング方法は以下に示した。

MON88017 系統: 1 ポットにつき 30 粒播種し、3 反復で発芽率の調査を行った。発芽率調査後に生育調査のため無作為にポットあたり 5 株とした。

LY038 系統: 1 ポットにつき 30 粒播種し、3 反復で発芽率の調査を行った。発芽率調査後に生育調査のため無作為にポットあたり 5 株とした。

MON89034 系統: 1 ポットにつき 3 粒播種し、15 ポット分を 1 反復とし 3 反復で発芽率の調査を行った。発芽率調査後に生育調査用に無作為にポットあたり 1 株とし、10 ポット/反復とした。

MON87460 系統: 1 ポットにつき 3 粒播種し、4 ポット分を 1 反復とし、10 反復で発芽率の調査を行った。発芽率調査後に生育調査用に無作為にポットあたり 1 株とした。

10

土壌微生物相試験：

収穫時に形態及び生育特性調査区の各反復ごとに中央 2 条の株間の任意の 5 箇所から、土壌サンプリングボーラーを用いて、約 20cm の深度で土壌を採取した (表層 3~5 cm は除く)。採取した土壌は、各プロットごとに十分に混和した。各供試材料の各反復毎の採取土壌 3 g を秤量し、12 ml の滅菌水に懸濁した。この土壌懸濁液を 10 倍原液として、100 倍 ( $10^2$ )、1,000 倍 ( $10^3$ )、10,000 倍 ( $10^4$ ) 及び 100,000 倍 ( $10^5$ ) の希釈液を調整した。希釈液を十分に懸濁し (ボルテックス・ミクスチャーで 1 分)、ピペットで 50  $\mu$ l とり、細菌・放線菌用培地 (PTYG 培地) 及び糸状菌用培地 (ローズベンガル培地) の入った一枚のシャーレに滴下し、コンラージ棒を用いて全面塗布した。この際、滴下した希釈液がほとんどなくなり、コンラージ棒のすべりが悪くなるまで塗布を続けた。塗布終了後、すべてのシャーレの側面をパラフィルムでシールし、培地表面を下に向けて暗下 25~28°C で培養した。培養開始から 5 日目後 ~7 日目後にシャーレごとのコロニー数をカウントした。なお、各系統のサンプリング方法は以下に示した。

MON88017 系統: 各希釈濃度ごとに 4 シャーレを用意し、これを 1 反復として 3 反復で調査を行った。

LY038 系統:各希釈濃度ごとに 5 シャーレを用意し、これを 1 反復として 3 反復で調査を行った。

5 MON89034 系統: 各希釈濃度ごとに 5 シャーレを用意し、これを 1 反復として 3 反復で調査を行った。

MON87460 系統: 各希釈濃度ごとに 5 シャーレを用意し、これを 1 反復として 4 反復で調査を行った。

10

鋤込み試験 :

GM トウモロコシ及び対照の Non-GM トウモロコシの地上部を 60°C、172 時間乾燥してミキサーで粉碎した後、1 kg のクレハ園芸培土に 0.5%の割合で混和した。育苗用  
15 ポット (直径 10.5 cm, 高さ 9.0 cm) に混和土壌 (300 g) を詰め、検定植物であるハツカダイコン (MON88017 系統及び LY038 系統では品種「アイシクル」、MON89034 系統及び MON87460 系統では品種「フレンチブラックファースト」) の種子を播種し、温室で発芽率 (MON89034 系統は発芽株数も含む) を調査した。また、播種後 22 ~ 39 日目に収穫し、その生体重 (MON87460 系統を除く)、乾物重 (MON88017 系統及び  
20 MON89034 系統を除く)、並びに草丈 (MON88017 系統及び LY038 系統を除く) を調査した。なお、各系統のサンプリング方法は以下に示した。

MON88017 系統: 1 ポットにつき 30 粒播種し、3 反復で発芽率の調査を行った。発芽率調査後に生育調査のため無作為にポットあたり 5 株とした。

25

LY038 系統: 1 ポットにつき 30 粒播種し、3 反復で発芽率の調査を行った。発芽率調



査後に生育調査のため無作為にポットあたり 5 株とした。

MON89034 系統: 1 ポットにつき 3 粒播種し、13 ポット分を 1 反復とし 3 反復で発芽率の調査を行った。発芽率調査後に生育調査のため無作為にポットあたり 1 株とし、10  
5 ポット/反復とした。

MON87460 系統: 1 ポットにつき 3 粒播種し、4 ポット分を 1 反復とし、10 反復で発芽率の調査を行った。発芽率調査後に生育調査のため無作為にポットあたり 1 株とした。

## 10 2-3 結果

### 2-3-1) 形態及び生育の特性

#### MON88017 系統

形態及び生育に関する特性として評価した 12 項目 (発芽揃い、発芽率、雄穂抽出期、絹糸抽出期、稈長、着雌穂高、分けつ数、草型、成熟期、収穫期の地上部重、粒型、粒  
15 色) のうち、稈長において GM トウモロコシ 017-B と対照の Non-GM トウモロコシ Cont-B の間で統計学的有意差が認められ、017-B の稈長の平均値は 226.9 cm、Cont-B は 233.4 cm だった (表 2-4)。一方、GM トウモロコシ 017-A と対照の Non-GM トウモロコシ Cont-A の間で統計学的有意差や差異は認められなかった (表 2-4)。

#### 20 LY038 系統

形態及び生育に関する特性として評価した 12 項目 (発芽揃い、発芽率、雄穂抽出期、絹糸抽出期、稈長、着雌穂高、分けつ数、草型、成熟期、収穫期の地上部重、粒型、粒  
25 色) のうち、GM トウモロコシ LY038-A では、対照の Null 型トウモロコシ Cont-38A との間で、稈長に統計学的有意差が認められ、LY038-A の稈長の平均値は 219.7 cm、Cont-38A の稈長の平均値は 210.4 cm だった (表 2-4)。一方、GM トウモロコシ LY038-B と対照の Null 型トウモロコシ Cont-38B の間で統計学的有意差や差異は認められなかつ



た (表 2-4)。

#### MON89034 系統

5 形態及び生育に関する特性として評価した 13 項目 (発芽揃い、発芽株数、発芽率、雄穂抽出期、絹糸抽出期、稈長、着雌穂高、分けつ数、草型、成熟期、収穫期の地上部重、粒型、粒色) において、GM トウモロコシ MON89034 系統と対照の Non-GM トウモロコシとの間に統計学的有意差や差異は認められなかった (表 2-5)。

#### MON87460 系統

10 形態及び生育に関する特性として評価した 12 項目 (発芽揃い、発芽率、雄穂抽出期、絹糸抽出期、稈長、着雌穂高、分けつ数、草型、成熟期、収穫期の地上部重、粒型、粒色) において、GM トウモロコシ MON87460 系統と対照の Non-GM トウモロコシとの間に統計学的有意差や差異は認められなかった (表 2-5)。

#### 15 2-3-2) 生育初期における低温耐性

5°Cの低温条件下において生育させた GM トウモロコシ (MON88017 系統、LY038 系統、MON89034 系統) 及びそれらの対照の Non-GM トウモロコシは、人工気象室へ移してから 22~35 日後には枯死していることが確認された。

#### 20 2-3-3) 成体の越冬性

トウモロコシは夏型一年生植物であり、結実後、冬季の降霜等により枯死する。再生長して栄養繁殖することや、種子を生産することはない。実際に、隔離ほ場で生育させた全ての GM トウモロコシ (MON88017 系統、LY038 系統、MON89034 系統、MON87460 系統) 及びそれらの対照の Non-GM トウモロコシを成熟期の後も引き続き生育させ、11 月あるいは 12 月に供試個体の観察を行ったが、GM トウモロコシ及び対照の Non-GM トウモロコシともに枯死していた。

25

#### 2-3-4) 花粉の稔性及びサイズ

ヨウ素ヨードカリ溶液で染色した花粉を顕微鏡で観察した結果、いずれの GM トウモロコシ系統及びそれらの対照の Non-GM トウモロコシともに高い花粉稔性を示しており、その稔性に差異は認められなかった。また、花粉の形態や大きさにも差異は認められなかった (図 2-1)。

#### 2-3-5) 種子の生産量、脱粒性、休眠性及び発芽率

##### MON88017 系統

10 種子の生産量に関する評価項目 (有効雌穂数、雌穂長、雌穂径、粒列数、一穂着粒数、一列粒数、百粒重) 及び収穫種子の発芽率を比較した結果、雌穂径において GM トウモロコシ 017-B と対照の Non-GM トウモロコシ Cont-B の間で統計学的有意差が認められ、017-B の雌穂径の平均値は 44.0 mm、Cont-B は 45.7 mm であった (表 2-6)。一方、GM トウモロコシ 017-A と対照の Non-GM トウモロコシ Cont-A の間で統計学的有意差  
15 は認められなかった (表 2-6)。

##### LY038 系統

種子の生産量に関する評価項目 (有効雌穂数、雌穂長、雌穂径、粒列数、一穂着粒数、一列粒数、百粒重) 及び収穫種子の発芽率を比較した結果、雌穂径と粒列数において GM トウモロコシ LY038-A とその対照の Null 型トウモロコシ Cont-38A との間で統計学的有意差が認められ、LY038-A の雌穂径と粒列数はそれぞれ 4.5 cm と 14.7 cm、Null 型トウモロコシ Cont-38A はそれぞれ 4.6 cm と 15.9 cm であった (表 2-6)。また、GM トウモロコシ LY038-B とその対照の Null 型トウモロコシ Cont-38B との間で粒列数、一穂着粒数、百粒重、収穫種子の発芽率において統計学的有意差が認められ、LY038-B の  
20 粒列数、一穂着粒数、百粒重、収穫種子の発芽率はそれぞれ 14.3 列、584.1 粒、30.7 g、  
25 97.8 %であり、Cont-38B はそれぞれ 16.9 列、725.6 粒、26.6 g、93.3 %であった (表 2-6)。

#### MON89034 系統

5 種子の生産量に関する評価項目 (有効雌穂数、雌穂長、雌穂径、粒列数、一穂着粒数、一列粒数、百粒重)、脱粒性、収穫種子の発芽率及び発芽株数を比較した結果、雌穂径と一穂着粒数において MON89034 系統と対照の Non-GM トウモロコシとの間に統計学的有意差が認められた (表 2-7)。MON89034 系統の雌穂径と一穂着粒数の平均値は、それぞれ 5.1 cm と 663.6 粒であり、対照の Non-GM トウモロコシでは、それぞれ 5.0 cm と 592.1 粒であった (表 2-7)。

#### 10 MON87460 系統

種子の生産量に関する評価項目 (有効雌穂数、雌穂長、雌穂径、粒列数、一穂着粒数、百粒重)、及び収穫種子の発芽率を比較した結果、全ての項目において MON87460 系統と対照の Non-GM トウモロコシとの間に統計学的有意差は認められず、目視による脱粒性に関しても差異は認められなかった (表 2-7)。

15

#### 2-3-6) 有害物質の産生性

GM トウモロコシから土壤微生物 (細菌、放線菌及び糸状菌) あるいは植物に影響を与える物質が産生されていないことを確認するため、後作試験、土壤微生物相試験及び鋤込み試験を行った。

20 その結果、MON88017 系統においては、鋤込み試験でハツカダイコンの生体重に GM トウモロコシ 017-A の栽培土壌と対照の Non-GM トウモロコシ Cont-A の栽培土壌との間で統計学的有意差が認められ、その平均値は 7.17 g と 8.38 g であった (表 2-12)。なお、後作試験及び土壤微生物相試験ではいずれの項目においても統計学的有意差は認められなかった (表 2-8 及び表 2-10)。

25 LY038 系統においては、後作試験で LY038-A の栽培土壌とその対照の Null 型トウモロコシ Cont-38A の栽培土壌との間で、ハツカダイコンの生体重に統計学的有意差が認



められ、その平均値は 22.7 g と 19.5 g であった (表 2-8)。また、LY038-B の栽培土壌とその対照の Null 型トウモロコシ Cont-38B の栽培土壌との間で、ハツカダイコンの乾物重に統計学的有意差が認められ、その平均値はそれぞれ 1.17 g と 1.40 g であった (表 2-8)。なお、土壌微生物相試験及び鋤込み試験ではいずれの項目においても統計学的有意差は認められなかった (表 2-10 及び表 2-12)。

MON89034 系統と MON87460 系統においては、後作試験、土壌微生物相試験及び鋤込み試験で、いずれの項目においても統計学的有意差は認められなかった (表 2-9、表 2-11 及び表 2-13)。

## 10 2-4 考察

### 隔離ほ場試験の結果に基づく項目ごとの生物多様性影響評価

以下に MON88017 系統、LY038 系統、MON89034 系統及び MON87460 系統の隔離ほ場試験において収集された情報が、項目ごとにどのようにして生物多様性影響評価に用いられたかについて詳しく記載し、日本における GM トウモロコシの生物多様性影響評価の実例を報告する。これらの隔離ほ場試験の詳細についてはこれまで社外秘として一般に公開されていなかったものである。このようにトウモロコシに限ってではあるが、隔離ほ場試験において収集された情報を明らかにし、GM トウモロコシの生物多様性影響評価の実例を報告することで、日本における導入遺伝子や宿主作物の蓄積された知見 (ファミリー) に基づく評価に貢献することを目的とした。

20 なお、実際の生物多様性影響評価では、導入遺伝子により意図的に改変された形質が及ぼす影響についての考察も併せて行われるが、本章では隔離ほ場試験の結果に基づいた評価結果のみを記載する。

#### 2-4-1) 競合における優位性

25 トウモロコシの栽培起源は今から 9,000 年前とされている (OECD, 2003)。その後、人類の手により育種、品種改良が行われ、紀元前 1500 年 ~ 200 年頃には、現代の栽培

型に近いトウモロコシが出現し、メキシコ、メソアメリカの地から南北アメリカ大陸の各地に伝播した。日本には、1579年に導入された(菊池, 1987)。

5 競合性が高く、優占化する傾向にある雑草は、いくつかの特性(例: 休眠性、長期間に渡る大量の種子生産、裂莢性など)を二つ以上併せ持つことが知られている(Anderson, 1996; Baker, 1974; Radosevich et al., 1997)。その一方で、トウモロコシの完熟した種子は雌穂の苞で覆われており、脱粒性はない。また、トウモロコシは長い間栽培植物として利用されてきた過程で、人の手が入らない自然条件下で世代交代を繰り返し自生する能力を失っている(OECD, 2003)。

10 競合性における項目では、上述したように高度に栽培化され自然条件下における自生能力を失ったトウモロコシが、新たに付与された形質又は形質転換により生じた非意図的影響により、周辺の野生植物と競合し、駆逐するほどの競合における優位性を獲得するかを以下のように評価した。

15 MON88017 系統の競合における優位性に関わる諸形質(形態及び生育の特性、生育初期における低温耐性、成体の越冬性、花粉の稔性及びサイズ、種子の生産量、休眠性及び発芽率)を比較検討した結果、稈長及び雌穂径の項目でのみ GM トウモロコシ 017-B と対照の Non-GM トウモロコシ Cont-B との間で、統計学的有意差が認められた(表 2-4 及び表 2-6)。しかし、1998年から2010年までに実施した11系統の GM トウモロコシの隔離ほ場試験において、対照として用いられた Non-GM トウモロコシから得られた平均値の最小値と最大値を従来トウモロコシの変動の範囲(表 2-4 及び表 2-6)として比較した場合、有意差の認められた稈長及び雌穂径における GM トウモロコシ 20 017-B の平均値は、従来トウモロコシにおける変動の範囲内であることが確認された(表 2-4 及び表 2-6)。このことから、これらの差異によって MON88017 系統の競合における優位性が高まるとは考えにくいと判断された。このように、仮に GM トウモロコシ 25 と対照の Non-GM トウモロコシとの間に統計学的有意差が認められた場合でも、有意差の認められた項目が、これまで栽培されてきた Non-GM トウモロコシの種内品種間

変動の範囲内であれば、その差異による影響は、従来のトウモロコシを超えるものではないという考え方は、前述した「ファミリアリティ」の概念に基づいている (OECD, 2005)。

5 LY038 系統の競合における優位性に関わる諸形質 (形態及び生育の特性、生育初期における低温耐性、成体の越冬性、花粉の稔性及びサイズ、種子の生産量、休眠性及び発芽率) を比較検討した結果、GM トウモロコシ LY038-A では、対照の Null 型トウモロコシ Cont-38A との間で、稈長、雌穂径及び粒列数に統計学的有意差が認められ (表 2-4 及び表 2-6)、もう一方の供試 GM トウモロコシ LY038-B においては、対照の Null  
10 型トウモロコシ Cont-38B との間で、粒列数、一穂着粒数、百粒重及び収穫種子の発芽率に統計学的有意差が認められた (表 2-6)。しかし、上述の従来トウモロコシの変動の範囲 (表 2-4 及び表 2-6) と比較した場合、有意差の認められた稈長、雌穂径、粒列数、一穂着粒数及び百粒重における LY038 系統の平均値は、全て従来トウモロコシにおける変動の範囲内であることが確認された (表 2-4 及び表 2-6)。また、収穫種子の発芽率  
15 についても、LY038-A と LY038-B は、共に 95 %以上と高い発芽率を示しており、結論として休眠性は持たないと考えられた。したがって、これらの差異によって LY038 系統の競合における優位性が高まるとは考えにくいと判断された。

MON89034 系統の競合における優位性に関わる諸形質 (形態及び生育の特性、生育  
20 初期における低温耐性、成体の越冬性、花粉の稔性及びサイズ、種子の生産量、脱粒性、休眠性及び発芽率) を比較検討した結果、雌穂径と一穂着粒数において、MON89034 系統と対照の Non-GM トウモロコシとの間に統計学的有意差が認められたが (表 2-7)、従来トウモロコシの変動の範囲 (表 2-7) と比較した場合、有意差の認められた雌穂径と一穂着粒数における MON89034 系統の平均値は、全て従来トウモロコシにおける変動の範囲内であることが確認された。したがって、これらの差異によって MON89034  
25 系統の競合における優位性が高まるとは考えにくいと判断された。



MON87460 系統の競合における優位性に関わる諸形質 (形態及び生育の特性、成体の越冬性、花粉の稔性及びサイズ、種子の生産量、脱粒性、休眠性及び発芽率) を比較検討した結果、いずれの調査項目においても差異は認められなかった。

- 5 さらに、MON87460 系統中で発現する改変 CSPB は RNA シャペロンとして働き、土壌水分を制限した条件下において、光合成産物を発達中の雌穂に分配するなど重要な生理的機能を保持することにより、収量の減少を抑制するため、通常の灌漑条件に加えて、灌漑を行わない条件下で試験を行った。さらに、その自生能力を調査するために灌漑、施肥、病虫害駆除、雑草管理などの栽培管理を行わない条件下でも試験を行った。その
- 10 結果、MON87460 系統は成体の越冬性、脱粒性及び休眠性において、対照の Non-GM トウモロコシとの間に差異が認められなかったことから、雑草性について差異はないと判断された。一方、付与された乾燥耐性により、灌漑を行わない条件下及び栽培管理を行わない条件下において、対照の Non-GM トウモロコシと比較し、種子の生産量が高いことが確認されたものの、MON87460 系統の種子生産能力は、栽培管理を行わない条件下では、栽培管理を行う条件下と比べ著しく低下していることが確認された (日本モンサント株式会社, 2012)。また、通常の栽培条件で栽培した場合、MON87460 系統の生産性は従来のトウモロコシ品種と同等であり、すなわち、競合における優位性は従来のトウモロコシ品種と比べて高まっていないと考えられた。

#### 20 2-4-2) 有害物質の産生性

- トウモロコシは日本に導入された 1579 年以来、長期間の使用経験があり、これまでトウモロコシにおいて有害物質の産生性は報告されていない。しかしながら、MON88017 系統、LY038 系統、MON89034 系統及び MON87460 系統に意図的に付与された形質又は遺伝子導入による非意図的な影響に起因して各 GM トウモロコシにおいて、有害物質の産生性に起因する生物多様性影響が生ずる恐れがないかを以下のように
- 25 考察した。

MON88017 系統における有害物質の産生性の有無に関して、後作試験、土壤微生物相試験及び鋤込み試験 (表 2-8、表 2-10 及び表 2-12) を行い比較検討した。その結果、鋤込み試験において、GM トウモロコシ 017-A とその対照である Non-GM トウモロコシ系統 Cont-A の間でハツカダイコンの生体重に統計学的有意差が認められたが (表 2-12)、同時に試験に供試した他の 2 イベント (001-A、012-A) では、ハツカダイコンの生体重に統計学的有意差は認められなかった (表 2-14)。また、鋤込み試験におけるハツカダイコンの発芽率や後作試験及び土壤微生物相試験では 017-A と Cont-A の間で統計学的有意差は認められなかったことから、GM トウモロコシ 017-A において観察されたハツカダイコンの生体重の統計学的有意差は 017-A において有害物質の産生性が増大したことによるとは考えにくいと判断された。

LY038 系統における有害物質の産生性の有無に関して、後作試験、土壤微生物相試験及び鋤込み試験 (表 2-8、表 2-10 及び表 2-12) を行い比較検討した。その結果、ハツカダイコンを用いた後作試験において、GM トウモロコシ LY038-A の栽培土壌ではハツカダイコンの生体重で、LY038-B の栽培土壌ではハツカダイコンの乾物重でそれぞれ GM トウモロコシと対照の Null 型トウモロコシとの間で統計学的有意差が認められた (表 2-8)。しかしながら、GM トウモロコシ LY038-A と対照の Null 型トウモロコシ Cont-38A の栽培土壌におけるハツカダイコンの生体重は、LY038-A の値 (22.7 g) の方が Cont-38A (19.5 g) よりも高く、乾物重では有意差が認められなかった。これに対して、LY038-B と対照の Null 型トウモロコシ Cont-38B の栽培土壌におけるハツカダイコンの乾物重では、LY038-B の値 (1.17 g) は Cont-38B (1.40 g) よりも低く、生体重では有意差は認められなかった。以上のように、LY038-A と LY038-B が、それぞれの対照の Null 型トウモロコシとの間で示した有意差には、LY038 系統でハツカダイコンの生育を阻害するような有害物質の産生性が高まっていることを示唆する一貫した傾向は認められなかった。

MON89034 系統における有害物質の産生性の有無に関して、後作試験、土壌微生物相試験及び鋤込み試験 (表 2-9、表 2-11 及び表 2-13) を行い比較検討した。その結果、  
5 5 5 5 5  
いずれの試験項目においても MON89034 系統と対照の Non-GM トウモロコシとの間に統計学的有意差は認められなかった。よって、MON89034 系統において意図しない有害物質の産生性はないと考えられた。

MON87460 系統における有害物質の産生性の有無に関して、後作試験、土壌微生物相試験及び鋤込み試験 (表 2-9、表 2-11 及び表 2-13) を行い比較検討した。その結果、  
10 10 10 10 10  
いずれの試験項目においても MON87460 系統と対照の Non-GM トウモロコシとの間に統計学的有意差は認められなかった。よって、MON87460 系統において意図しない有害物質の産生性はないと考えられた。

#### 2-4-3) 交雑性

15 トウモロコシの近縁種は *Tripsacum* 属と *Zea* 属に分類されるテオシントであるが、トウモロコシと自然交雑可能なのはテオシントのみである。日本では、テオシント及び *Tripsacum* 属の野生種は報告されていない。よって、交雑性に起因する生物多様性影響を受ける可能性のある野生動植物等は特定されなかった。以上のことから、いずれの GM トウモロコシ系統も交雑性に起因する生物多様性影響を生ずるおそれはないと判  
20 断された。

上述したように、除草剤グリホサート耐性及びコウチュウ目害虫抵抗性の形質を持つ MON88017 系統、高リシンの形質を持つ LY038 系統、チョウ目害虫抵抗性の形質を持つ MON89034 系統、及び乾燥耐性の形質を持つ MON87460 系統について、項目ごとの生物多様性影響評価を行った結果、生物多様性に影響を及ぼすような非意図的な影響  
25 は認められず、総合的評価として、これら GM トウモロコシ系統を第一種使用規程に従



って使用した場合に生物多様性影響が生ずるおそれはないと結論された。

日本における生物多様性影響評価では、明文化されてはいないが実質的にはファミリーアリティの概念が用いられている。この概念は既述したように、ほとんどの GM 生物が、栽培作物のようにその特性が良く理解されている生物から作られるという事実に基づいている。すなわち、隔離ほ場試験の結果、仮に対照の Non-GM トウモロコシとの間に統計学的有意差が認められた場合でも、有意差の認められた項目の値が、過去に隔離ほ場で栽培された Non-GM トウモロコシの平均値の最大値と最小値の範囲内であるなど、これまで栽培されてきた Non-GM トウモロコシの種内品種間変動の範囲内であれば、その差異による影響は、従来のトウモロコシが環境に与える影響を超えるものではないと判断できる (Horak et al., 2014)。さらに、従来トウモロコシの変動の範囲に関する情報がない場合は、有意差の認められた項目が、これまで栽培されてきたトウモロコシの範囲を超えると仮定して、導入遺伝子の形質を含めたこれらの差異が、競合における優位性や有害物質の産生性に起因する生物多様性影響を生ずるかの観点で生物多様性影響評価が行なわれている (Horak et al., 2014)。このように、ファミリーアリティの概念を取り入れながら系統ごと (Product base) に評価を行なう日本の生物多様性影響評価手法は、米国農務省 (USDA) が採用している環境リスク評価の手法と一致している (Raybould et al., 2012)。

隔離ほ場で収集する情報については、農林水産省による通知に掲載されている場合であっても、それらを収集する必要がないと考えられる合理的な理由がある場合は、収集しなくても良いこととなっている (農林水産省, 2007)。通知に掲載されている後作試験、土壌微生物相試験及び鋤込み試験は、GM 作物中でのアレロパシー等の有害物質の産生性を調査するための項目であるが、現在のところこれらの調査項目は、宿主作物や導入遺伝子の特性にかかわらず全ての GM 作物に対して一律に求められている。仮に GM 作物から有害物質が産生されるとすれば、その原因は導入遺伝子産物である場合と、

導入遺伝子の挿入箇所による影響である場合が考えられる。ここで述べる挿入箇所による影響とは、目的遺伝子が植物ゲノムに挿入される際に内在性遺伝子が破壊されたあるいは導入遺伝子の近傍に新たなオープンリーディングフレーム (ORF) が形成された場合のことである。しかし、本章における有害物質の産生性に関する調査項目の試験結果からも明らかなように、導入遺伝子の位置効果等により非意図的にアレロパシー物質等の有害物質を放出した事例は少なくとも本章で示した一連の GM トウモロコシでは確認されていない。また、トウモロコシを含めて現在までに隔離ほ場試験を終えた全 9 作物種、77 系統の GM 作物においても、導入遺伝子の位置効果等により、非意図的にアレロパシー物質等の有害物質が産生されたという結果はこれまでに確認されていない。

さらに、トウモロコシの栽培起源は今から 9,000 年前とされており (OECD, 2003)、現在に至るまでの従来育種による品種改良の過程でトウモロコシのゲノム中では、トランスポゾンによる DNA 断片の転移などが頻繁に起こっていると考えられる。しかし、これまでのところ従来育種による品種改良によってもトウモロコシから非意図的にアレロパシー物質等の有害物質が産生された報告はない。これらのことから、トウモロコシのように長期間の使用経験があり、有害物質の産生性が報告されていない宿主作物においては、導入遺伝子の挿入箇所による影響等により非意図的な形態の変化等を示す可能性はあっても、有害物質を突然産生する可能性は、従来育種による品種改良以上に高まることはないと考えられた。

以上のことから、トウモロコシのような長期間の使用経験があり、有害物質の産生性が報告されていない宿主植物で、導入遺伝子についても生理学・遺伝学的見地から有害物質の産生性に関与しないことが明らかな場合は、その科学的知見を学術論文あるいはデータベース等の引用で示すことで、有害物質の産生性に関する情報の収集の代替とすることが可能になると考えられる。本章の目的も、生理学・遺伝学的見地から有害物質の産生性に関与しないと考えられる除草剤耐性、害虫抵抗性、栄養改変等の遺伝子をトウモロコシに導入した場合の日本の環境下での知見を蓄積することで、これらの GM トウモロコシのファミリーを構築することである。このように GM 作物の温室等

での試験結果を知見として蓄積し、類似した形質を持つ GM 作物を評価する際に用いることは、OECD により提唱されているファミリーリティの概念 (OECD, 2005) とも一致している。

5           また、既述したように日本においては、栽培される予定がなく、食品・飼料・加工 (FFP) 用途としてのみの目的で使用される GM 作物については、栽培用種子への意図せざる混入などの懸念から、日本における隔離ほ場試験が求められている。しかしながら、中国を除くその他の輸入国のほとんどは、仮に栽培用種子への意図せざる混入があったとしても、当該 GM 作物の環境への暴露量が極めて低いことを考慮して環境リスク評価  
10           を行っている。例えば、EU や南米諸国では、栽培を前提とする場合は自国での隔離ほ場試験を要求するのに対して、食品・飼料・加工 (FFP) 用途としてのみの使用を予定している場合は、栽培国で収集された隔離ほ場試験の結果を用いて環境リスク評価を行  
15           っている。さらに、第3章で詳細は述べるが、最近では栽培を目的とする場合であっても、一つの栽培国での隔離ほ場試験の結果をその他の複数の栽培国間で共有する枠組み作りが、ほ場試験データのトランスポートビリティとして検討されはじめている (Garcia-Alonso et al., 2014)。

          日本においてもトウモロコシに限ってではあるが、論文等により作用機序が明らかな遺伝子が導入されており、その遺伝子によって付与された性質により生じさせる可能性のある生物多様性影響の程度が、既に第一種使用規程の承認を受けているトウモロコシ  
20           の生物多様性影響と同程度又は超えないと認められるものであれば、日本における隔離ほ場試験は実施しなくても良いことになった (農林水産省消費・安全局長ら, 2014)。

          このように、申請案件ごとに考慮することを前提として、日本においてもこれまでの隔離ほ場試験に関する知見の蓄積と、諸外国における GM 作物の規制との整合性を科学的に考慮しながら、栽培国で収集された隔離ほ場試験の結果を有効に活用する可能性  
25           について幅広く議論される時期に来ていると言える。



表 2-1 1998 年から 2010 年までに隔離ほ場試験に供試された GM トウモロコシ系統

供試系統名	導入遺伝子	付与された形質
DLL25 系統	<i>bar</i>	除草剤グルホシネート耐性
NK603 系統	改変 <i>cp4 epsps</i>	除草剤グリホサート耐性
MON863 系統	改変 <i>cry3Bb1</i>	コウチュウ目害虫抵抗性
MON810 系統	<i>cry1Ab</i>	チョウ目害虫抵抗性
MON88001 系統	改変 <i>cp4 epsps</i> 改変 <i>cry3Bb1</i>	除草剤グリホサート耐性 コウチュウ目害虫抵抗性
MON88012 系統	改変 <i>cp4 epsps</i> 改変 <i>cry3Bb1</i>	除草剤グリホサート耐性 コウチュウ目害虫抵抗性
MON88017 系統*	改変 <i>cp4 epsps</i> 改変 <i>cry3Bb1</i>	除草剤グリホサート耐性 コウチュウ目害虫抵抗性
LY038 系統*	<i>cordapA</i>	高リシン含量
MON89034 系統*	<i>cry1A.105</i> 改変 <i>cry2Ab2</i>	チョウ目害虫抵抗性
MON87460 系統*	改変 <i>cspB</i> <i>nptII</i>	乾燥耐性 抗生物質耐性マーカー
MON87427 系統	第3章 改変 <i>cp4 epsps</i>	第4章 除草剤グリホサート 誘発性雄性不稔 第5章 除草剤グリホサート 耐性

\*第 2 章で隔離ほ場試験の結果を提示した系統

表 2-2 形態及び生育の特性に関する評価項目とその定義

評価項目	第6章定義
発芽揃い	80%の個体が発芽した日(月日)
発芽株数	最終的に発芽した個体の株数 (MON89034 系統のみ)
発芽率	発芽した個体の割合(%)
雄穂抽出期	50%の個体が雄穂抽出始めに達した日(月日)
絹糸抽出期	50%の個体で絹糸抽出が観察された日(月日)
稈長	主稈の地際より穂首までの長さ(cm)
着雌穂高	地際から最上位雌穂着生節までの長さ(cm)
分けつ数	分けつの数 (主稈を除く)
草型	葉の着生角度の程度(上位葉角度)
成熟期	雌穂中央部を爪で押して硬化の程度を判断する(月日)
収穫期の地上部重	調査個体 1 個体当たりの地上部の生体重(kg)
粒型	収穫した穀粒を平面に置いたときの形
粒色	収穫した穀粒の色

表 2-3 種子の生産量に関する評価項目とその定義

評価項目	定義
有効雌穂数	1/3 以上を穀粒で覆われている雌穂の数
雌穂長	雌穂の基部より先端までの長さ(cm)
雌穂径	雌穂中央部の直径(cm)
粒列数	雌穂の中央部における粒列の数
一穂着粒数	一雌穂に着粒した穀粒の数
一列粒数	雌穂基部から先端までの粒数 (MON87460 系統を除く)
百粒重	雌穂中央部の粒を集めて各雌穂ごとに測定(MON88017 系統、LY038 系統) あるいは約 40 g の穀粒を計った後、その数をカウントする。その後 1 粒あたりの重量に 100 をかけて 100 粒重とする (MON89034 系統、MON87460 系統) (g)



表 2-4 形態及び生育の特性の調査結果 (MON88017 系統、LY038 系統)

項目	MON88017 系統				LY038 系統				変動 の 範囲 <sup>5)</sup>
	017-A		017-B		Cont-38A		LY038-B		
	平均値 <sup>2)</sup> (標準偏差)	有意差 <sup>1)</sup>	平均値 (標準偏差)	有意差	平均値 (標準偏差)	有意差	平均値 (標準偏差)	有意差	
発芽揃い (月日)	6.10	-	6.10	-	6.12	-	6.12	-	-
発芽率 (%)	99.6 (0.64)	無	99.6 (0.64)	無	97.8 (0)	無	96.3 (1.04)	無	93.4-99.8
雄穂抽出期 (月日)	7.29	-	7.29	-	8.3	-	8.1	-	-
絹糸抽出期 (月日)	8.1	-	8.4	-	8.4	-	8.2	-	-
稈長 (cm)	231.6 (2.09)	無	226.9 (0.57)	有	219.7 (9.62)	有	236.5 (6.48)	無	179.7- 276.5
着雌穂高 (cm)	105.3 (0.50)	無	97.3 (1.46)	無	89.3 (4.7)	無	98.9 (7.52)	無	71.1- 135.2
分けつ数	0	-	0	-	1.2 (0.75)	-	1.1 (0.57)	-	-
草型 <sup>3)</sup>	DD	-	DD	-	TND	-	TND	-	-
成熟期 (月日)	9.3	-	9.4	-	9.12	-	9.10	-	-
収穫期の 地上部重 (kg)	1.23 (0.02)	無	1.19 (0.02)	無	1.14 (0.039)	無	1.14 (0.031)	無	0.50-1.33
粒型 <sup>4)</sup>	D.F	-	D.F	-	D.F	-	D.F	-	-
粒色	黄白	-	黄	-	黄白	-	黄白	-	-

1) 発芽率、稈長、着雌穂高、収穫期の地上部重については、分散分析により統計処理を行った (P<0.05 で有意)。

2) 発芽率、稈長、着雌穂高、分けつ数、収穫期の地上部重については平均値を示した。

3) 最上部雌穂着生節より上位の葉の稈に対する角度で評価: 30°=立型 (UP)、~60°=中間型 (TND)、60°~開平型 (DD)

4) 収穫した穀粒を平面に置いたときの形: D.= デント、D.F.= デント/フリント、F.= フリント

5) 過去に実施した GM トウモロコシ [DLL25 系統 (1998 年)、NK603 系統 (2000 年)、MON863 系統 (2000 年)、MON810 系統 (1996 年、2001 年)、MON88001 系統 (2002 年)、MON88012 系統 (2002 年)、MON88017 系統 (2002 年)、LY038 系統 (2004 年)、MON89034 系統 (2006 年)、MON87460 系統 (2010 年)、MON87427 系統 (2010 年)] の隔離ほ場試験において、対照として用いられた Non-GM トウモロコシの調査結果に基づく平均値の最小値と最大値。

表 2-5 形態及び生育の特性の調査結果 (MON89034 系統、MON87460 系統)

項目	MON89034 対照品種		MON87460 対照品種		変動の範囲 <sup>6)</sup>
	平均値 <sup>3)</sup> (標準偏差)	有意差 <sup>1)</sup>	平均値 (標準偏差)	有意差 <sup>2)</sup>	
発芽揃い (月日)	5.31	-	6.19	-	-
発芽株数 (/360 株)	348	無	-	-	-
発芽率 (%)	96.7 (0.00)	-	99.6 (0.48)	無	93.4 - 99.8
雄穂抽末期 (月日)	7.15	-	7.26	-	-
絹糸抽末期 (月日)	7.18	-	7.29	-	-
稈長 (cm)	178.6 (2.27)	無	223.8 (8.2)	無	179.7 - 276.5
着雌穂高 (cm)	82.5 (3.71)	無	100.7 (6.2)	無	71.1 - 135.2
分けつ数	0 (0.00)	-	0.53 (0.22)	無	-
草型 <sup>4)</sup>	UP	-	UP	-	-
成熟期 (月日)	8.24	-	9.6	-	-
収穫期の地上部重 (kg)	0.88 (0.02)	無	0.81 (0.08)	無	0.50 - 1.33
粒型 <sup>5)</sup>	D.F	-	D.F	-	-
粒色	黄	-	黄	-	-

<sup>1)</sup> 発芽株数については Fisher's exact test により統計処理を行い、稈長、着雌穂高、収穫期の地上部重については分散分析により統計処理を行った (P<0.05 で有意)。なお、分けつ数については個体間でばらつきが認められなかつたため、統計処理を行っていない。

<sup>2)</sup> 発芽率、稈長、着雌穂高、分けつ数、収穫期の地上部重については、分散分析により統計処理を行った (P<0.05 で有意)。

<sup>3)</sup> 発芽率、稈長、着雌穂高、分けつ数、収穫期の地上部重については平均値を示した。

<sup>4)</sup> 最上部雌穂着生節より上位の葉の稈に対する角度で評価: 30°=立型 (UP)、~60°=中間型 (TND)、60°~開平型 (DD)

<sup>5)</sup> 収穫した穀粒を平面に置いたときの形: D.=デント、D.F.=デント/フリント、F.=フリント

<sup>6)</sup> 過去に実施した GM トウモロコシ [DLL25 系統 (1998 年)、NK603 系統 (2000 年)、MON863 系統 (2000 年)、MON810 系統 (1996 年、2001 年)、MON88001 系統 (2002 年)、MON88012 系統 (2002 年)、MON88017 系統 (2002 年)、LY038 系統 (2004 年)、MON89034 (2006 年)、MON87460 系統 (2010 年)、MON87427 系統 (2010 年)] の隔離ほ場試験において、対照として用いられた Non-GM トウモロコシの調査結果に基づく平均値の最小値と最大値。

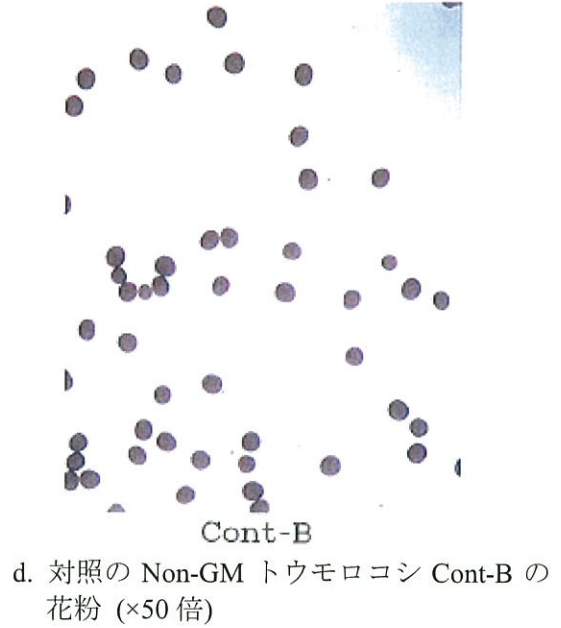
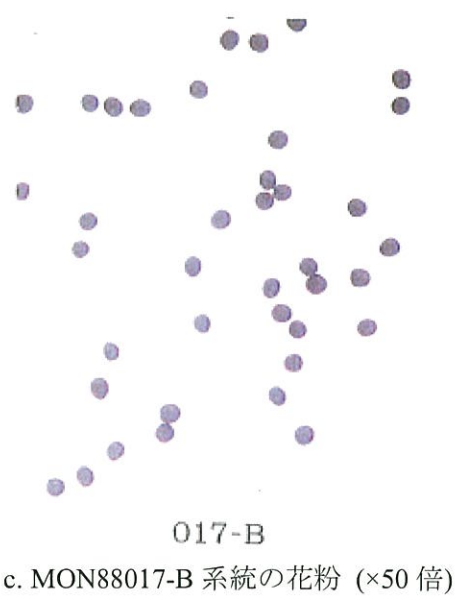
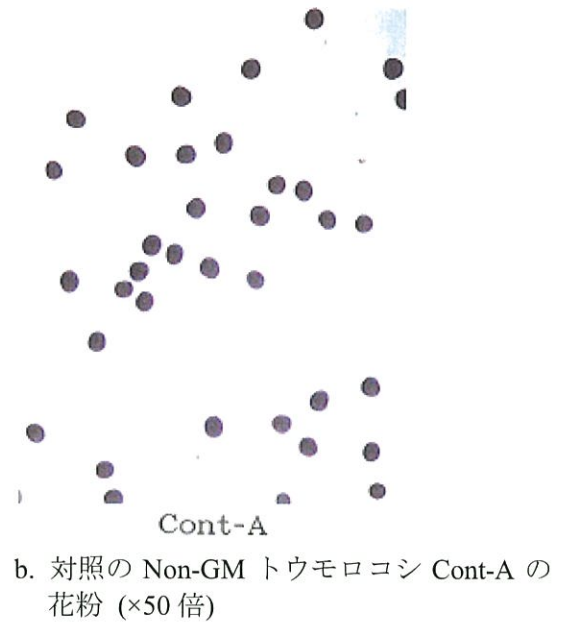
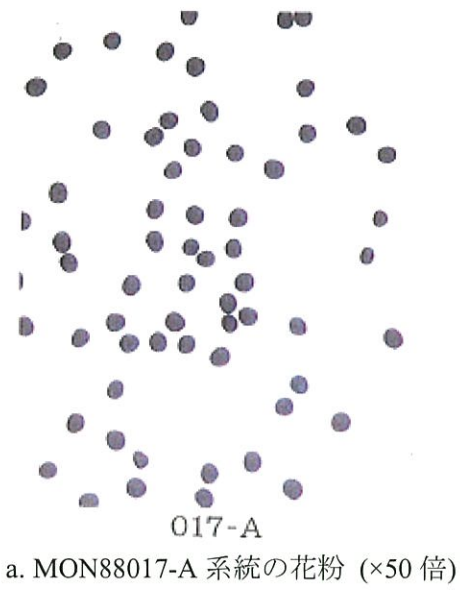
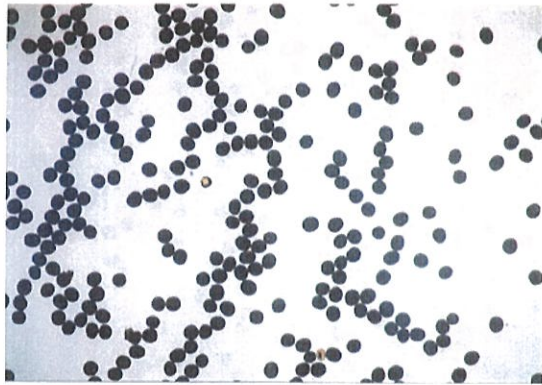
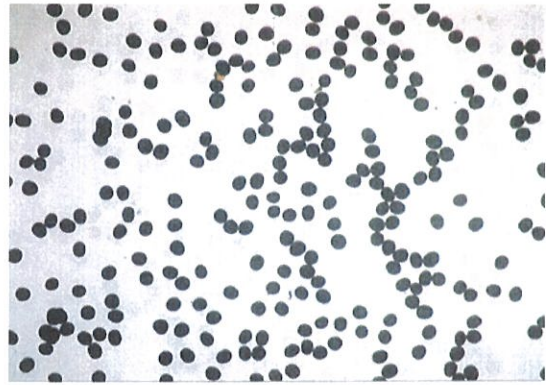


図 2-1 花粉の稔性及びサイズの結果

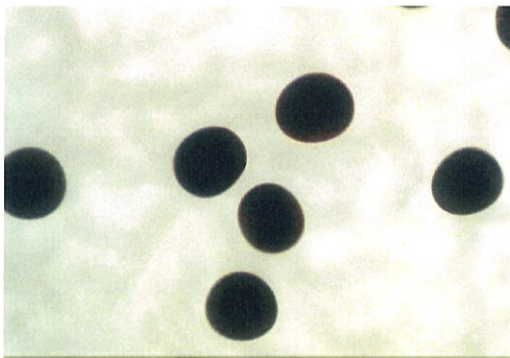




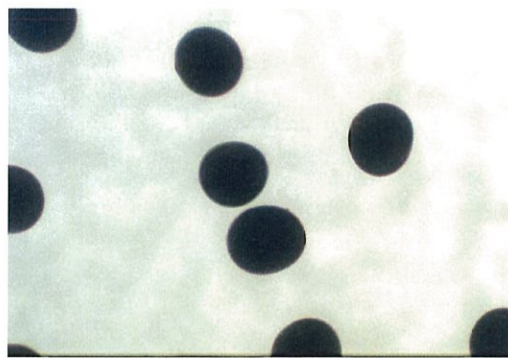
g. LY038-B 系統の花粉 (×20 倍)



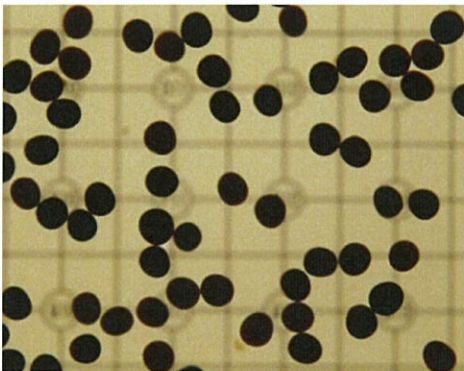
h. 対照の Null 型トウモロコシ Cont-38B の花粉 (×20 倍)



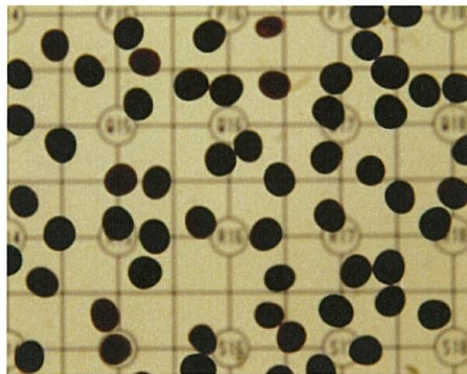
i. MON89034 系統の花粉 (×200 倍)



j. 対照の Non-GM トウモロコシの花粉 (×200 倍)



k. MON87460 系統の花粉 (×100 倍)



l. 対照の Non-GM トウモロコシの花粉 (×100 倍)

図 2-1 花粉の稔性及びサイズの結果 (続き)

表 2-6 種子の生産量に関する評価項目、休眠性及び発芽率 (MON88017 系統、LY038 系統)

項目	MON88017 系統						LY038 系統						変動 の範囲 <sup>2)</sup>				
	017-A		Cont-A		017-B		Cont-B		LY038-A		Cont-38A			LY038-B		Cont-38B	
	平均値 (標準偏差)	平均値 (標準偏差)	有意差 <sup>1)</sup>	平均値 (標準偏差)	平均値 (標準偏差)	有意差	平均値 (標準偏差)	平均値 (標準偏差)	有意差	平均値 (標準偏差)	平均値 (標準偏差)	有意差		平均値 (標準偏差)	平均値 (標準偏差)	有意差	
有効雌穂数	1.0 (0.0)	1.0 (0.0)	無	1.0 (0.0)	1.0 (0.0)	無	1.0 (0.0)	1.0 (0.0)	無	1.0 (0.0)	1.0 (0.0)	無	1.0 (0.0)	1.0 (0.0)	無	-	
雌穂長 (cm)	21 (0.14)	20.5 (0.19)	無	19.9 (0.5)	21.0 (0.79)	無	17.5 (0.82)	16.6 (0.28)	無	17.5 (0.25)	17.2 (0.28)	無	17.5 (0.25)	17.2 (0.28)	無	13.8 - 22.7	
雌穂径 (cm)	45.3 mm (1.20)	44.5 mm (0.58)	無	44.0 mm (0.61)	45.7 mm (0.10)	有	4.5 (0.023)	4.6 (0.065)	有	4.8 (0.013)	4.9 (0.072)	無	4.8 (0.013)	4.9 (0.072)	無	3.6 - 5.3	
粒列数	13.1 (0.82)	12.3 (0.38)	無	13.6 (0.33)	13.3 (0.50)	無	14.7 (0.50)	15.9 (0.19)	無	14.3 (0.50)	16.9 (0.50)	有	14.3 (0.50)	16.9 (0.50)	有	12.3 - 16.9	
一穂着粒数	587.6 (43.1)	549.2 (52.5)	無	539.8 (26.6)	582.5 (11.9)	無	559.7 (7.04)	610.0 (28.15)	無	584.1 (5.45)	725.6 (34.91)	無	584.1 (5.45)	725.6 (34.91)	有	549.2 - 728.6	
一列粒数	45.9 (1.16)	46.1 (0.81)	無	41.1 (0.50)	44.7 (1.89)	無	39.5 (1.37)	39.7 (1.20)	無	39.5 (1.37)	43.9 (0.50)	無	41.4 (1.23)	43.9 (0.50)	無	23.6 - 46.2	
百粒重 (g)	35.0 (1.21)	33.7 (0.47)	無	32.4 (0.38)	34.4 (1.61)	無	29.1 (0.82)	28.1 (0.78)	無	29.1 (0.82)	26.6 (0.60)	無	30.7 (0.44)	26.6 (0.60)	有	22.3 - 43.9	
収穫種子の 発芽率 (%)	100.0 (0.00)	98.9 (1.96)	無	96.6 (3.35)	100.0 (0.00)	無	98.9 (1.56)	96.7 (2.74)	無	98.9 (1.56)	97.8 (2.92)	無	97.8 (2.92)	93.3 (0)	有	-	

<sup>1)</sup> 分散分析により統計処理を行った (P<0.05 で有意)。

<sup>2)</sup> 過去に実施した GM トウモロコシ [DLL25 系統 (1998 年)、NK603 系統 (2000 年)、MON863 系統 (2000 年)、MON810 系統 (1996 年、2001 年)、MON88001 系統 (2002 年)、MON88012 系統 (2002 年)、MON88017 系統 (2002 年)、LY038 系統 (2004 年)、MON89034 (2006 年)、MON87460 系統 (2010 年)、MON87427 系統 (2010 年)、MON87427 系統 (2010 年)] の隔離ほ場試験において、対照として用いられた Non-GM トウモロコシの調査結果に基づき平均値の最小値と最大値。



表 2-7 種子の生産量に関する評価項目、脱粒性、休眠性及び発芽率 (MON89034 系統、MON87460 系統)

項目	MON89034 対照品種		MON87460 対照品種		変動の範囲 <sup>3)</sup>
	平均値 (標準偏差)	平均値 (標準偏差)	平均値 (標準偏差)	平均値 (標準偏差)	
有効雌穂数	1.0 (0.00)	1.0 (0.00)	1.0 (0.00)	1.025 (0.05)	-
雌穂長 (cm)	16.7 (0.27)	16.1 (0.99)	無	22.36 (0.81)	13.8 - 22.7
雌穂径 (cm)	5.1 (0.06)	5.0 (0.04)	有	4.19 (0.03)	3.6 - 5.3
粒列数	16.8 (0.40)	16.1 (1.01)	無	14.00 (0.38)	12.3 - 16.9
一穂着粒数	663.6 (18.98)	592.1 (31.87)	有	559.96 (40.46)	549.2 - 728.6
一列粒数	40.4 (0.53)	37.9 (4.17)	無	-	23.6 - 46.2
百粒重 (g)	29.3 (0.67)	30.3 (0.05)	無	29.95 (2.67)	22.3 - 43.9
脱粒性の有無	無	無	-	無	-
収穫種子の	99.40 (0.98)	100 (0)	-	99.50 (1.00)	-
発芽率 (%)	179	180	無	-	-
収穫種子の 発芽株数 (/180 株) <sup>2)</sup>					

<sup>1)</sup> 脱粒性及び MON89034 系統の収穫種子の発芽率及び発芽株数以外の項目については、分散分析により統計処理を行った (P<0.05 で有意)。なお、有効雌穂数については個体間でばらつきが認められなかつたため、統計処理を行っていない。

<sup>2)</sup> MON89034 系統の収穫種子の発芽株数については Fisher's exact test により統計処理を行った (P<0.05 で有意)。

<sup>3)</sup> 過去に実施した GM トウモロコシ [DLL25 系統 (1998 年)、NK603 系統 (2000 年)、MON863 系統 (2000 年)、MON810 系統 (1996 年、2001 年)、MON88001 系統 (2002 年)、MON88012 系統 (2002 年)、MON88017 系統 (2002 年)、LY038 系統 (2004 年)、MON89034 (2006 年)、MON87460 系統 (2010 年)、MON87427 系統 (2010 年)] の隔離ほ場試験において、対照として用いられた Non-GM トウモロコシの調査結果に基づく平均値の最小値と最大値。



表 2-8 後作試験におけるハツカダイコンの発芽率、生体重及び乾物重 (MON88017 系統、LY038 系統)

項目	MON88017 系統			LY038 系統			
	017-A 平均値 (標準偏差)	Cont-A 平均値 (標準偏差)	有意差 <sup>1)</sup>	LY038-A 平均値 (標準偏差)	LY038-B 平均値 (標準偏差)	Cont-38B 平均値 (標準偏差)	有意差
発芽率 (%)	96.7 (2.74)	98.9 (1.56)	無	87.8 (4.15)	86.7 (4.71)	93.3 (7.22)	無
生体重 (g)	3.0 (0.42)	3.29 (0.81)	無	22.7 (4.38)	19.3 (3.58)	20.8 (3.32)	無
乾物重 (g)	-	-	-	1.28 (0.29)	1.17 (0.17)	1.40 (0.22)	無

1) 分散分析により統計処理を行った (P<0.05 で有意)。

表 2-9 後作試験におけるハツカダイコンの発芽株数、発芽率、草丈生体重及び乾物重(MON89034 系統、MON87460 系統、MON89034 系統、MON87460 系統)

項目	MON89034 対照品種		MON87460 対照品種		有意差 <sup>1)</sup>
	平均値 (標準偏差)	平均値 (標準偏差)	平均値 (標準偏差)	平均値 (標準偏差)	
発芽株数 (135株)	135	134	-	-	無
発芽率 (%)	100 (0.00)	99.3 (1.27)	94.20 (7.91)	95.00 (7.03)	-
草丈 (cm)	15.72 (0.69)	15.08 (0.63)	16.53 (0.50)	17.01 (0.60)	無
生体重 (g)	8.41 (0.23)	8.59 (0.39)	-	-	無
乾物重 (g)	-	-	0.51 (0.04)	0.55 (0.04)	無

<sup>1)</sup> MON89034 系統の発芽株数については、Fisher's exact test により統計処理を行った。それ以外の項目については、分散分析により統計処理を行った (P<0.05 で有意)。

表 2-10 土壌微生物相試験における細菌数、放線菌数及び糸状菌数 (CFU/g)(MON88017 系統、LY038 系統)

項目	MON88017 系統			LY038 系統				
	017-A 平均値 (標準偏差)	Cont-A 平均値 (標準偏差)	有意差 <sup>1)</sup>	LY038-A 平均値 (標準偏差)	Cont-38A 平均値 (標準偏差)	LY038-B 平均値 (標準偏差)	Cont-38B 平均値 (標準偏差)	有意差
細菌数	4.75×10 <sup>7</sup> (6.33×10 <sup>6</sup> )	4.48×10 <sup>7</sup> (5.60×10 <sup>6</sup> )	無	3.20×10 <sup>7</sup> (0.21×10 <sup>7</sup> )	3.87×10 <sup>7</sup> (0.44×10 <sup>7</sup> )	3.35×10 <sup>7</sup> (0.18×10 <sup>7</sup> )	3.17×10 <sup>7</sup> (0.30×10 <sup>7</sup> )	無
放線菌数	6.12×10 <sup>6</sup> (8.72×10 <sup>6</sup> )	6.83×10 <sup>6</sup> (1.91×10 <sup>6</sup> )	無	4.08×10 <sup>6</sup> (0.60×10 <sup>6</sup> )	3.97×10 <sup>6</sup> (0.30×10 <sup>6</sup> )	3.61×10 <sup>6</sup> (0.08×10 <sup>6</sup> )	4.08×10 <sup>6</sup> (0.60×10 <sup>6</sup> )	無
糸状菌数	2.90×10 <sup>5</sup> (7.63×10 <sup>4</sup> )	3.07×10 <sup>5</sup> (3.85×10 <sup>4</sup> )	無	2.79×10 <sup>5</sup> (0.30×10 <sup>5</sup> )	2.71×10 <sup>5</sup> (0.10×10 <sup>5</sup> )	2.75×10 <sup>5</sup> (0.26×10 <sup>5</sup> )	2.74×10 <sup>5</sup> (0.48×10 <sup>5</sup> )	無

<sup>1)</sup> 分散分析により統計処理を行った (P<0.05 で有意)。



表 2-11 土壌微生物相試験における細菌数、放線菌数及び糸状菌数 (CFU/g)(MON89034 系統、MON87460 系統、MON87460 系統)

項目	MON89034 対照品種		MON87460 対照品種		有意差 <sup>1)</sup>
	平均値 (標準偏差)	平均値 (標準偏差)	平均値 (標準偏差)	平均値 (標準偏差)	
細菌数	7.1×10 <sup>8</sup> (3.3×10 <sup>8</sup> )	7.3×10 <sup>8</sup> (2.8×10 <sup>8</sup> )	6.0×10 <sup>8</sup> (6.3×10 <sup>7</sup> )	6.2×10 <sup>8</sup> (7.0×10 <sup>7</sup> )	無
放線菌数	5.4×10 <sup>8</sup> (0.5×10 <sup>8</sup> )	7.2×10 <sup>8</sup> (1.6×10 <sup>8</sup> )	8.0×10 <sup>7</sup> (2.7×10 <sup>7</sup> )	9.3×10 <sup>7</sup> (1.1×10 <sup>7</sup> )	無
糸状菌数	3.7×10 <sup>7</sup> (0.8×10 <sup>7</sup> )	3.0×10 <sup>7</sup> (0.4×10 <sup>7</sup> )	5.5×10 <sup>7</sup> (2.7×10 <sup>7</sup> )	3.8×10 <sup>7</sup> (1.7×10 <sup>7</sup> )	無

<sup>1)</sup> 分散分析により統計処理を行った (P<0.05 で有意)。

表 2-12 鋤込み試験におけるハツカダイコンの発芽率、生体重及び乾物重 (MON88017 系統、LY038 系統)

項目	MON88017 系統			LY038 系統			
	017-A 平均値 (標準偏差)	Cont-A 平均値 (標準偏差)	有意差 <sup>1)</sup>	LY038-A 平均値 (標準偏差)	LY038-B 平均値 (標準偏差)	Cont-38B 平均値 (標準偏差)	有意差
発芽率 (%)	97.8 (1.91)	100 (0.00)	無	84.4 (4.16)	84.4 (6.85)	84.4 (1.57)	無
生体重 (g)	7.17 (0.21)	8.38 (0.10)	有	23.3 (12.75)	31.9 (7.58)	26.3 (7.82)	無
乾物重 (g)	-	-	-	1.03 (0.47)	1.23 (0.23)	1.08 (0.24)	無

<sup>1)</sup> 分散分析により統計処理を行った (P<0.05 で有意)。

表 2-13 鋤込み試験におけるハツカダイコンの発芽率、発芽株数、草丈、生体重及び乾物重 (MON89034 系統、MON87460 系統、MON87460 系統)

項目	MON89034 対照品種		MON87460 対照品種		有意差 <sup>1)</sup>
	平均値 (標準偏差)	平均値 (標準偏差)	平均値 (標準偏差)	平均値 (標準偏差)	
発芽株数 (/117 株)	117	116	-	-	無
発芽率 (%)	100 (0.00)	99.1 (1.48)	83.33 (15.21)	88.30 (8.96)	-
草丈 (cm)	10.77 (0.47)	11.19 (0.49)	18.84 (0.91)	17.95 (1.05)	無
生体重 (g)	8.59 (0.48)	9.21 (1.47)	-	-	無
乾物重 (g)	-	-	0.95 (0.10)	0.97 (0.10)	無

<sup>1)</sup> MON89034 系統の発芽株数については、Fisher's exact test により統計処理を行った。それ以外の項目については、分散分析により統計処理を行った (P<0.05 で有意)。



表 2-14 鋤込み試験におけるハツカダイコンの発芽率及び生体重 (MON88001 系統、MON88012 系統、MON88012 系統)

項目	MON88001 対照品種		MON88012 対照品種	
	平均値 (標準偏差)	平均値 (標準偏差)	平均値 (標準偏差)	平均値 (標準偏差)
発芽率 (%)	99.0 (1.73)	100 (0.00)	99.0 (1.73)	100 (0.00)
生体重 (g)	7.34 (0.86)	8.38 (0.10)	8.10 (0.17)	8.38 (0.10)
		有意差 <sup>1)</sup> 無		有意差 無

<sup>1)</sup> 分散分析により統計処理を行った (P<0.05 で有意)。

## 第7章 栽培国で収集された隔離ほ場試験結果の、輸入国での生物多様性影響評価を行うためのトランスポートビリティ (情報の可搬性) の検討

### 7-1 緒言

GM 作物の栽培承認に先立って、国内での隔離ほ場試験を実施することは、GM 作物に関する規制が整備されている国々においては、一般的に定着しているプロセスである。その一方で、GM 作物の商業栽培を行わない場合であっても、国内での隔離ほ場試験の実施が求められる国は、現時点では日本と中国のみである。EU は大量の GM ダイズやセイヨウナタネをコモディティとして主にブラジルやカナダから輸入しているが、栽培を目的としていない場合は、栽培国において得られた隔離ほ場試験の結果を用いてこれらの GM 作物の環境リスク評価を行っている (EFSA Panel on Genetically Modified Organisms (GMO), 2010)。同様に韓国も GM 作物をコモディティとして輸入する場合は、栽培国の隔離ほ場試験の結果を用いてこれらの GM 作物の環境リスク評価を行っている (Rural Development Administration (RDA), 2014)。

その一方で農林水産省は 2014 年 12 月にトウモロコシに限ってではあるが、導入された遺伝子の働きが良く理解されている場合は栽培国で実施された隔離ほ場試験データに基づいて生物多様性影響評価を行うデータのトランスポートビリティを認める旨を発表した (農林水産省消費・安全局長ら, 2014)。ただし、導入された遺伝子の働きが良く理解されていると認知されるには、査読済みの発行物又は官公庁の調査委員会の根拠づけにより、その作用機序が完全に理解されている必要がある。加えて、評価の対象となる形質の効果は、すでに承認されている他の形質を越えるものであってはならない (農林水産省消費・安全局長ら, 2014)。例えば Bt 蛋白質を発現するチョウ目害虫抵抗性トウモロコシの生物多様性影響評価を栽培国である米国で取得されたデータを用いて行う場合は、その Bt 蛋白質の殺虫効果が、過去に評価された Bt 蛋白質の殺虫活性を著しく超えないといったことが求められる。

このように、新規の形質が付与された GM トウモロコシの栽培国における隔離ほ場試験データのトランスポートビリティが認められていない理由の一つとしては、土壌、気象な

どの生育環境が異なれば、GM トウモロコシが栽培国とは異なる生育を示す可能性があることが挙げられる (與後, 2010)。現在のところ、農林水産省はトウモロコシ以外の作物については栽培国の隔離ほ場試験データのトランスポータビリティを認めていない。例えば、ワタに関しては日本の自然環境における生育に関する情報の不足、セイヨウナタネは比較的高い雑草性、ダイズは日本における交雑種の存在等の理由から、GM ワタ、セイヨウナタネ、ダイズについては、栽培国の隔離ほ場試験データのトランスポータビリティを認めていない。なお、ここで述べる雑草性とは、通常「人の活動によって干渉されることが多い非農耕地で定着及び自生できる能力」と定義される (下野, 2015)。

本章では、1) 隔離ほ場試験を実施する目的、2) 宿主作物の雑草性、3) 栽培国で得られた隔離ほ場試験データの信頼性を検討することにより、栽培国 (米国、カナダ、南米諸国など) で得られた GM 作物の隔離ほ場試験データを、日本など輸入国で生物多様性影響評価を行う際に利用するデータのトランスポータビリティについて考察する。

## 7-2 GM 作物の隔離ほ場試験データの栽培国から輸入国へのトランスポータビリティを決定する要因

### 7-2-1) 隔離ほ場試験を実施する目的

GM 作物の隔離ほ場試験データの栽培国から輸入国へのトランスポータビリティを検討するためには、隔離ほ場試験の目的を明確にすることが重要となる。GM 作物は土壌や気象条件が異なる環境下では、異なる生育を示す可能性があるが、環境リスク評価における隔離ほ場試験の目的は、GM 作物の形態・生育特性を、それぞれの国の環境条件下で可能な限り詳細に把握することではない。その目的はむしろ、GM 作物に対照の Non-GM 作物と比較して、環境リスク評価の評価エンドポイントに影響を与えるような非意図的で有害な変化が生じていないかを確認することである (Raybould, 2007)。評価エンドポイントは、環境リスク評価の初期段階に行われる問題の定式化プロセス (Problem Formulation) の中で定義される (U.S. Environmental Protection Agency, 1998)。また、この評価エンドポイントは定式化プロセスの結果によって異なるが、GM 作物の環



環境リスク評価を行ううえで、広く採用され、世界的に認知されている評価エンドポイントには「GM 作物または GM 作物と交雑した野生種と競合した結果に起因する希少種の減少」や「導入遺伝子による有害な影響」が挙げられる (Chandler and Dunwell, 2008; Lu, 2008)。日本における生物多様性影響評価でも同様に、GM 作物の「競合における優位性」または「有害物質の産生性」を評価することで、近隣の希少種の集団サイズを減少させるか、またはその他の生態系に負の影響を与えるか (例: 非標的生物 (NTO) への負の影響) を確認している (日本版バイオセーフティクリアリングハウス, 2015b)。

GM 作物を導入することにより起こりうる環境リスクのシナリオの一つを、Raybould (2010) が、以下の六つのステップに分けて説明している。1. GM 作物が種子を生産する、2. 生産された種子が非農耕地に散布される、3. 散布された種子が非農耕地で発芽・生育後に定着する、4. この GM 作物が非農耕地で自生集団を形成する、5. この自生集団が繁茂する、6. この GM 作物の自生集団のサイズの拡大に伴い、周辺に生息する希少種の個体数が減少する (生態学的悪影響)。

GM 作物が非農耕地で自生集団を形成するほどの雑草性を獲得したかどうかを評価する環境リスク評価では、上述した六つのステップを直接試験により確認することはない。その代わりに、GM 作物と遺伝的背景がほぼ同じ Non-GM 作物を隔離ほ場で栽培して、形態・生育特性等の比較を行うことで、GM 作物がその宿主作物と比較して、非農耕地で自生集団を形成するほどの雑草性を獲得しているかを評価している (Raybould et al., 2012)。隔離ほ場試験で GM 作物と対照の Non-GM 作物の形態・生育特性を比較した際に、統計学的有意差が検出された場合は、その差異により GM 作物の雑草性が高まるかが評価のポイントとなる (Roberts et al., 2013)。

隔離ほ場試験で検出された統計学的有意差の意味を解釈する際には、前章でも述べたように一般的にファミリアリティの概念が用いられている (Horak et al., 2014; Horak et al., 2007)。経済協力開発機構 (Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD) が述べているように、環境リスク評価におけるファミリアリティとは、GM 作物の栽培が環境に与える影響を、従来作物 (Non-GM 作物) の栽培が環境に与える影響

と比較して評価するという概念である (Nickson and Horak, 2006; OECD, 1993)。例えば、GM 作物と対照の Non-GM 作物との間に統計学的有意差が検出された場合は、GM 作物の平均値は、同時に栽培した複数の従来品種の値の範囲または文献値の範囲におさまるか、つまりファミリーの有無が検討される。GM 作物の平均値が、これらの範囲外にある場合や文献値等が得られない場合には、検出された差異により宿主作物の雑草性に変化が生じるかを評価する (図 7-1)。

また、種子の休眠性、種間で競合する能力、短距離及び遠距離のいずれでも種子散布できる適応性、好ましい環境における高い種子生産性、全栽培地域での高い種子生産性など、多くの一般雑草にみられる一連の特性は、すでに雑草学者により特定されている (Anderson, 1996; Lingenfelter and Hartwig, 2003)。宿主作物のファミリーが欠如している場合、あるいは隔離ほ場試験での評価において、GM 作物と対照の Non-GM 作物との間に生存及び自生に関する特性に実質的な差があることが示された場合のみ、普段の隔離ほ場試験で収集される以上のデータを追加で収集する必要がある (Roberts et al., 2013)。

上述したように、環境リスク評価のための隔離ほ場試験の目的は、GM 作物の特性をできる限り詳細に把握することではなく、GM 作物に環境リスク評価の評価エンドポイントに影響を与えるような非意図的で有害な変化が生じていないかを確認することである (Raybould, 2007)。また、雑草性が低く、交雑可能な野生種が存在しない宿主作物においては、GM 作物の雑草性が高まっていないかを確認することが隔離ほ場試験の最も重要な目的となる。

#### 7-2-2) 宿主作物の雑草性

隔離ほ場試験の目的に加えて、宿主作物の雑草性を理解することも、隔離ほ場試験データのトランスポータビリティを考えるうえで重要である。現在、栽培されているトウモロコシ (*Zea mays* ssp. *mays* (L.) Iltis) は栽培化の過程で、種子の休眠性や散布性などの雑草性に関わる特性が失われた結果、農地以外で自生集団を形成する能力が制限され

ている。例えば、トウモロコシの雌穂は苞で覆われていることから、雌穂からの種子の脱粒及び散布は限られている。仮にトウモロコシの種子が収穫の際に畑にこぼれ落ちたり、輸送経路上にこぼれ落ちても、一般に生垣沿いや水路、道端にトウモロコシが集団を形成して自生することはない。文献で報告されているように、トウモロコシは人の仲介がなければ自然条件下で生き残るための適応性が低く、雑草として生き延びることはできない (Baker, 1965; Galinat, 1988; Keeler, 1989)。

日本では、2013年5～9月に、農林水産省が国内の港湾5カ所、荷揚げサイロ6カ所、飼料工場10カ所の周辺でトウモロコシの生育状況について調査したところ、荷揚げサイロから飼料工場までの輸送経路で1個体の生育が確認されたのみであった (農林水産省, 2014b)。

ダイズ (*Glycine max*) については、北米では耕作地以外にダイズが持続可能な集団として自生しているとする報告はない (OECD, 2000)。ツルマメ (*G. soja*) は、ダイズの交雑可能な野生種としてアジアの数カ国で自生している (OECD, 2000; 沼田ら, 1975; 日本雑草学会, 1991)。しかし、栽培種のダイズとツルマメは一般に自殖性であると考えられていることから、両者間の花粉媒介による遺伝子流動は限られている。ちなみに、種内の他花受粉率はダイズが0.30～3.62% (Beard and Knowles, 1971)、ツルマメが平均で2.3% (Kiang et al., 1992) と報告されている。

また、農林水産省は2009年から2012年にかけて、過去にダイズ穀粒の輸入実績がある上位10港の周囲5km圏内でダイズの自生状況について調査を行っている。その結果、2009年には1年間に最大16株のダイズ生育個体が発見され、そのうち2株がGMダイズであった (農林水産省, 2011a, b, 2012, 2013)。日本におけるダイズの輸入量が年間約300万トンであることを考えると、この結果は食品・飼料・加工 (FFP) 用途として輸入したダイズが輸送中にこぼれ落ちて、そのまま生育する割合が極めて低いことを示している。



ワタ (*Gossypium hirsutum*) もまた祖先の野生種から栽培化の過程で、長い種子休眠期間、埋土種子の長い寿命、長期にわたる大量の種子生産性、高い脱粒性、分散に適した種子散布機構などの雑草種特有の特性が失われている (Coppens d'Eeckenbrugge and Lacape, 2014; OECD, 2008; OGTR, 2008)。また、ワタは多くの国  
5 で栽培が開始されてから、数十年から数百年経過しているが、これらの国々でワタが雑草化したという報告はなく (OECD, 2008)、日本でも耕作地以外でワタが集団を形成して自生しているとする報告はない。

セイヨウナタネ (*Brassica napus*) は、道端沿いや工業地帯など定期的に攪乱される土地で生育することが知られている (OECD, 1997)。日本では、河川敷に栽培されている  
10 とする報告があり (清水ら, 2001; 国土交通省, 2015)、荷卸し港周辺や輸送経路に生育する可能性がある (日本版バイオセーフティクリアリングハウス, 2013)。

セイヨウナタネは一般的に、荒廃地のような一時的に攪乱される環境条件下でも生育できる高い適応力を持つと考えられている (CFIA, 2005)。しかし、定期的に攪乱されない自然環境下では、森の多年草や樹木種、多年性低木との競合のため定着できないことが知られている (OECD, 1997)。帰化植物であるセイヨウタンポポ種 (*Taraxacum* spp.)  
15 やセイタカアワダチソウ (*Solidago altissima*) (小川, 2002; 服部, 2002) とは異なり、日本ではセイヨウナタネは生態系に影響を及ぼす侵略的外来種の範疇には入らない。ヨーロッパでも、セイヨウナタネは一般に生態学的に危険な侵入種とは考えられていない  
20 (European Commission, 2000)。また、人の手による定期的な攪乱の起こらない自然条件下には侵入できないことも報告されている (Crawley et al., 1993; European Commission, 2000; Hall et al., 2005)。非荒廃地に生育したとしてもセイヨウナタネ集団はわずか数年で消滅する傾向にあることが報告されている (Crawley and Brown, 1995; Hall et al., 2005)。

25 上述のように、セイヨウナタネは定期的に攪乱される環境では自生することができるが、自然条件 (非荒廃地の環境) 下では競合性がきわめて低く、侵入集団形成の能力

も低いため、生態系に影響を及ぼす可能性は低いと考えられている。

*B. rapa*、*B. nigra*、*Raphanus raphanistrum*、*Sinapis arvensis*、*B. juncea*、*Hirschfeldia incana* は、日本に存在するセイヨウナタネの交雑可能な種として知られている。しかし、*B. rapa* は栽培種であり、他の種は明治以降に帰化した植物であることを主な理由に、日本では  
5 いずれもカルタヘナ法で保護されるべき野生種として認知されていない (清水ら, 2001; 中井, 2003; 角田, 2001)。

上述した 4 作物を含むほとんどのコモディティ作物は、栽培化の過程で雑草性に関する形質の多くを喪失している (OECD, 2013)。さらに、雑草性に関する形質は複雑かつ多くの遺伝子によってコードされていることから、これらの雑草性に関する基本的な  
10 形質が土壌や気象条件が異なる環境下で容易に変化するとは考えにくい。したがって、祖先種の雑草性がほとんど失われるまでに高度に栽培化された宿主作物であれば、栽培国と輸入国間の環境条件が厳密に類似していなくとも、栽培国で収集した隔離ほ場試験データを用いて、輸入国で GM 作物が生育した場合の雑草性を十分に評価できると考え  
15 られる。ただし、セイヨウナタネは定期的に攪乱される環境では自生する能力を持つことから、さらなる知見の蓄積が必要と考えられる。

#### 7-2-3) 栽培国で得られた隔離ほ場試験データの信頼性

隔離ほ場試験データのトランスポータビリティをさらに詳しく検討するため、本章  
20 では米国及び日本で隔離ほ場試験が実施された 3 系統の GM トウモロコシの結果を比較した。この比較の目的は、栽培国である米国で収集された隔離ほ場試験データを、日本のような輸入国で生物多様性影響評価を行う際の信頼性を明らかにすることである。

具体的には、すでに米国と日本で隔離ほ場試験を行い、両国において環境安全性の承認を取得している高リシントウモロコシ LY038 系統、チョウ目害虫抵抗性トウモロ  
25 コシ MON89034 系統、乾燥耐性トウモロコシ MON87460 系統に関する隔離ほ場試験のデータを比較検証した。これら 3 系統の GM トウモロコシに関する申請書類は、米国農

務省動植物検疫局 (USDA APHIS) 及び日本版バイオセーフティクリアリングハウス (J-BCH) のウェブサイトですべて閲覧することができる (APHIS, 2015; 日本版バイオセーフティクリアリングハウス, 2015a)。

5 表 7-1 には、米国の多数のほ場で複数年にわたり実施された隔離ほ場試験の概要を示した。例えば、高リシントウモロコシ LY038 系統の形態・生育特性は、ミズーリ州、イリノイ州、インディアナ州、アイオワ州、ネブラスカ州において、2002 年には 10 ヲ所で、2003 年には 7 ヲ所で調査された (Monsanto Company, 2004)。これらの様々な試験  
10 地域は、米国の主要なトウモロコシ栽培地域の環境条件及び栽培管理条件を網羅している。特に、乾燥耐性トウモロコシ MON87460 系統は、(1) 灌漑を十分に行った条件、(2) 灌漑を十分に行った条件と制限した条件の両方、(3) 各栽培地域の一般的な灌漑方法に  
15 順じた条件など、他の GM トウモロコシ以上に多様な栽培条件で隔離ほ場試験が行われている。MON87460 系統は土壌水分が制限された条件下で、従来のトウモロコシよりも収量損失が抑えられることから、隔離ほ場試験は異なる土壌水分条件と環境条件下で  
20 MON87460 系統が環境に与える影響を評価できるように設計された (Sammons et al., 2014)。

一方、日本では栽培承認と輸入承認のいずれの場合であっても、1 ヲ所で 1 年の隔離ほ場試験で収集されたデータを用いて生物多様性影響評価が行われている (表 7-2)。また、米国の隔離ほ場試験では、近隣で栽培されている従来トウモロコシ品種との交雑を  
20 制限するのに十分な隔離距離を取って管理することができるが、日本では十分な隔離距離を取ることが難しいことから、通常は GM トウモロコシの雄穂を切除するか、袋掛けを行うことで近隣で栽培されている従来トウモロコシとの交雑を未然に防いでいる。このような隔離距離によらない物理的な交雑防止措置は、トウモロコシに対して生理的な  
25 ストレスを与えるため、信頼できるデータの収集を難しくする要因となっている。

25

GM トウモロコシ及びワタの環境リスク評価を行うに際して、隔離ほ場試験で収集



5 することが求められるデータは、米国と日本との間で異なる (表 7-3)。例えば、「生育初期における低温または高温耐性試験」及び「成体の越冬または越夏性試験」は、米国の隔離ほ場試験では求められていない。しかし、上述したように、米国の隔離ほ場試験はトウモロコシの主要栽培地域を網羅しており、幅広い温度条件下で行われているため、  
10 温度の感受性に対して変化がある場合は検出できると考えられる。さらに、GM 作物の環境リスク評価を行う際の要求項目は、科学的根拠に基づく仮説を立てたうえで決定 (仮説駆動型) されなければならないため、米国では低温耐性などの環境ストレス耐性試験は、全ての GM 作物ではなく、導入遺伝子の形質または通常の隔離ほ場試験の結果に応じて求められている。例えば、乾燥耐性トウモロコシ MON87460 系統においては、  
15 発現する低温ショック蛋白質 (CSPB) は細菌と植物の両方で複数の非生物的ストレスに対する影響を緩和させることが知られていることから (Castiglioni et al., 2008)、米国では温室や人工気象室などの管理された環境条件下で、乾燥、低温、高温、塩のストレスに対する耐性試験が実施されている。各ストレス耐性試験の結果、生育初期の MON87460 系統の非生物的ストレスに対する耐性は、従来のトウモロコシと比較して高  
20 まっていないと結論された (Monsanto Company, 2009)。GM 作物の仮説駆動型の環境リスク評価に従い、米国では LY038 系統及び MON89034 系統などの非生物的ストレスに対する耐性が予想されない GM トウモロコシに対しては、これらのストレスに対する耐性試験は求められなかった。

「生育初期における低温または高温耐性試験」と「成体の越冬または越夏性試験」  
20 に加えて、前章でも述べたように日本では「有害物質の産生性」として、GM 作物から他の植物種及び土壌微生物に対して影響を与える物質が産生されていないかを確認することが、付与された形質の特性にかかわらず全ての GM 作物に対して求められている (表 7-3)。米国では、このような有害物質の産生性に関わるデータは求められていないが、GM 作物の生育期間を通して生態的相互作用を定性的に評価している。この試験で  
25 は、GM 作物の害虫被害及び疾病の程度や、植物の環境ストレスに対する応答が、対照の Non-GM 作物と比べて有意に変化していないかを調べている。生態的相互作用に関

5 する調査で、有害物質の産生性が疑われる結果が認められた場合は、追加の試験を求められる可能性がある。さらに、チョウ目害虫抵抗性トウモロコシ MON89034 系統は、発現する Bt 蛋白質 (Cry1A.105、改変 Cry2Ab2) が、非標的生物に対して影響を及ぼす可能性があるので、こちらも仮説に基づき、さらに詳細での絞った非標的生物に対する試験が行われている。具体的には、MON89034 系統中で発現する Cry1A.105 蛋白質と改変 Cry2Ab2 蛋白質の作用機序、殺虫スペクトラム、MON89034 系統内での発現量、環境中での安定性、これら二つの蛋白質間での相互作用の可能性、代表的な非標的生物に対する給餌試験等が挙げられる。以上のような多岐にわたる環境リスク評価の結果、MON89034 系統の非標的生物や希少種に与える影響は考えにくいと結論された (Monsanto Company, 2006)。なお、高リシントウモロコシ LY038 系統及び乾燥耐性トウモロコシ MON87460 系統では殺虫作用を示す蛋白質は発現していないことから、MON89034 系統で行ったような非標的生物や希少種に対する包括的なリスク評価は行われていない。

15 米国と日本との間では、GM トウモロコシ及びワタの環境リスク評価を行うための要求項目には若干の相違がある。しかし、日本特有の要求項目である「生育初期における低温または高温耐性試験」、「成体の越冬または越夏性試験」、「有害物質の産生性」に関しては、米国では導入遺伝子の特性や、隔離ほ場試験の結果に応じてケースバイケースで評価されている。

20 その一方で、米国と日本の両国は、導入遺伝子の特性にかかわらず、雑草性に関連のある項目を評価している。例えば、米国では種子の休眠性、植物の倒伏性、種子莢の裂莢性は、ダイズの雑草性に関連する重要な形質として認識されている (Horak et al., 2014)。種子の休眠性を獲得することにより、種子は発芽能力を維持したまま越冬したり、年をまたいで自生集団を形成する可能性が高まる。さらに、植物の倒伏性及び種子莢の裂莢性が高まることにより、種子をより広範囲に散布できる可能性が高まる。成熟した種子が耕作地以外で雑草として生育するためには、生育に都合の良い土地に散布し、

25



成熟した後も収穫されないままである必要がある。米国では、このような雑草性に関連のある項目、トウモロコシでは落下雌穂数、倒伏性、収量、そして収穫種子の発芽率は、形態・生育特性の一部として導入遺伝子の特性にかかわらず、全ての GM 作物について評価されている。同じく、日本でも種子生産性に関連する形質 (粒列数など) や脱粒性、  
5 収穫種子の発芽率は、導入遺伝子の特性にかかわらず必ず評価される (表 7-3)。なお、日本では脱粒性については GM 作物と対照の Non-GM 作物を目視により比較しているため、この評価項目については統計学的比較が実施されていない。

本章では、米国の隔離ほ場で実施された LY038 系統、MON89034 系統、MON87460  
10 系統の形態・生育の特性試験の中から、トウモロコシの雑草性に関連する調査項目である落下雌穂数、収量、挫折型倒伏株数、収穫種子の発芽率 (表 7-4) の試験結果を示す。日本の評価からは、同様に雑草性に関連した調査項目である粒列数、百粒重、一穂着粒数、収穫種子の発芽率 (表 7-5) の調査結果を示す。

米国では、MON89034 系統 (2004 年) の挫折型倒伏株数と、チリの灌漑を制限した  
15 条件で生育した MON87460 系統の収量について統計学的有意差が認められた。しかし、MON89034 系統の挫折型倒伏株数の平均値 (0.8) は、同じほ場で栽培した従来品種の値の範囲内 (0.0 ~ 6.0) にあった。また、チリの灌漑を制限した条件下で生育した MON87460 系統の収量の平均値 (114.5 bu/a) も同じほ場で栽培した従来品種の値の範囲内 (56.4 ~ 167.6 bu/a) にあった (表 7-4)。チリの灌漑を制限した条件下における  
20 MON87460 系統の収量は、同じ条件で栽培した対照の Non-GM トウモロコシよりも高いことが予想されており、この結果から MON87460 系統の導入遺伝子の効果を実証された。

日本では、粒列数、一穂着粒数、百粒重、収穫種子の発芽率について、GM トウモ  
25 ロコシと対照の Non-GM トウモロコシとの間に統計学的有意差が認められた。しかし、GM トウモロコシの平均値 (粒列数 : LY038-A は 14.7、LY038-B は 14.3、一穂着粒数 : LY038-B は 584.1、MON89034 系統は 663.6、百粒重 : LY038-B が 30.7、収穫種子の発芽



率:MON89034 系統が 97.8) を、これまで隔離ほ場試験で対照として栽培された Non-GM トウモロコシの各評価項目における平均値の最小値と最大値の範囲 (粒列数: 12.3 ~ 16.9、一穂着粒数: 549.2 ~ 728.6、百粒重: 22.3 ~ 43.9、収穫種子の発芽率: 86.7 ~ 100.0) と比較したところ、GM トウモロコシの値は、全てが従来品種の値の範囲内であった (表 7-5)。

上述のとおり、米国と日本の両国は GM 作物と対照の Non-GM 作物との間に認められた統計学的有意差を解釈する際、ファミリーリティの概念を用いている。しかし、米国は統計学的有意差を解釈する際に、複数の隔離ほ場で試験を実施したり、同じほ場で同時に栽培した複数の従来品種の値の範囲を参照する点で、日本よりも厳格なプロセスを実践していると言える。例えば、米国では有意差が認められた場合の最初のステップとして、有意差は 1 ヲ所のほ場のみで認められたのか、複数のほ場を統合して行った統計処理の結果、認められたのかを調べる (図 7-1 のステップ 1 及び 2) (Horak et al., 2014; Horak et al., 2007)。次に、統計学的有意差が検出された GM 作物の平均値と、同じほ場で同時に栽培した従来品種の平均値の範囲を比較する (図 7-1 のステップ 3)。もし、GM 作物の平均値が従来品種の平均値の範囲外にある場合には、文献値の範囲と比較する。そして、もし GM 作物の平均値が、文献値の範囲外の場合は、GM 作物と対照の Non-GM 作物との間の差異の大きさと、その差異により GM 作物の雑草性や他の生態学的影響が出るかを評価することになる (図 7-1 のステップ 5) (Horak et al., 2014; Horak et al., 2007)。日本の隔離ほ場試験の場合には、同じほ場で十分な数の従来品種を栽培することが困難であるため、統計学的有意差が検出された場合は、差異の大きさや、その差異により GM 作物の雑草性や、他の生態学的影響が出るかを直接評価することになる場合がある (図 7-1 のステップ 5)。

米国で行われる隔離ほ場試験は、その作物が栽培され得る多様な地理的条件下で実施されている (Horak et al., 2014)。また、日米両国の環境リスク評価では「GM 作物と競合した結果に起因して他の植物種の数が減少する」という共通した評価エンドポイント

トを持ち、その評価の過程も類似していることから、米国で得られた隔離ほ場試験の結果は、輸入国である日本で生物多様性影響評価を行う際にも十分活用できると考えられる。

### 5 7-3 考察

栽培国で収集された隔離ほ場試験データの輸入国へのトランスポータビリティを検討する際には、隔離ほ場試験の目的を明確にしておくことが重要である。環境リスク評価における隔離ほ場試験の目的は、GM 作物の形態・生育特性を、それぞれの国の環境条件下で可能な限り詳細に把握することではなく、GM 作物に環境リスク評価の評価エンドポイントに影響を与えるような非意図的で有害な変化が生じていないかを確認することである (Raybould, 2007)。さらに、トウモロコシやワタのように雑草性が低く、交雑可能な野生種が存在しない宿主作物においては、GM 作物の雑草性が高まっていないかを確認することが、隔離ほ場試験の最も重要な目的となる。

15 宿主作物がどの程度の雑草性を有しているかを理解しておくことも、隔離ほ場試験データのトランスポータビリティを検討するうえで重要なポイントである。宿主作物に高い雑草性がある場合、または交雑可能な野生種が存在する場合には、輸入国での隔離ほ場試験の必要性を検討する必要がある。なぜなら、宿主作物にもともと雑草に近い競合性があり、さらに導入遺伝子が雑草性に関与する形質を有する場合は、僅かな環境条件の変化により  
20 当該 GM 作物の雑草性が変化する可能性が考えられるからである。

Garcia-Alonso et al. (2014) は、隔離ほ場試験が実施された国の農業気候区分 (agro-climatic zone) が、データのトランスポータビリティを検討している国の農業気候区分の代表的なものである場合に限っては、隔離ほ場試験データを利用できると提言している。しかし、筆者は、高度に栽培化されたトウモロコシやワタについては、GM 作物の雑草性が高まっていないかを確認することを目的とするのであれば、栽培国間であっても環境条件の厳密な類似性は必要ないと考えている。雑草性に関連する形質は複雑かつ多くの



遺伝子によってコードされており、ほとんどのコモディティ作物は野生の祖先種が有していた雑草性に関連する形質の多くを栽培化の過程で喪失していることから (OECD, 2013)、これらの雑草性に関する形質が、土壌や気象条件の異なる環境下で容易に変化するとは考えにくい。例えば、トウモロコシは世界で最も広く栽培されている穀物であり、米国の大部分、中国、ブラジル、アルゼンチン、ヨーロッパ諸国が含まれる北緯約 58 度から南緯約 40 度までの土壌や気象条件の大きく異なる地域で栽培されているが (OECD, 2003; 丸山, 1981)、現在までのところ、これらのトウモロコシが、ある一部の地域で定着及び自生したとする報告はない。また、一般的に隔離ほ場試験を行う際は、農薬等により病害虫によるストレスを最小限に抑える栽培管理がされており、栽培土壌も全ての試験作物が正常に育つように施肥等により均一化されていることから、栽培環境については栽培国間でそれほど大きな相違は認められないと考えられる。

さらに、異なる形質を有する GM トウモロコシ 3 系統 (LY038 系統、MON89034 系統、MON87460 系統) の米国と日本における隔離ほ場試験の結果を比較したところ、米国では日本よりも多様な環境条件で隔離ほ場試験が実施されていることが明らかとなった。また、日米両国の環境リスク評価では「GM 作物と競合した結果に起因して、周辺の希少種が減少する」という共通した評価エンドポイントを持ち、その評価もファミリーリティの概念に基づいて行われているところも類似している。このことから、米国で得られた隔離ほ場試験のデータを用いて、日本の自然環境下における GM 作物の生物多様性影響評価を行うことができると考えられた。

20

以上の考察に基づき、筆者は GM トウモロコシ及びワタの隔離ほ場試験データは、導入遺伝子の形質にかかわらず、栽培国から輸入国 (例えば米国から日本へ) へのトランスポータビリティがあると結論した。一方、セイヨウナタネやダイズなどのように、比較的高い雑草性を持つ宿主作物や交雑可能な野生種を持つ宿主作物については、引き続き検討を重ねる必要があるが、これらの宿主作物に対しても、栽培国の隔離ほ場試験で得られたデータの大部分は、日本における生物多様性影響評価を行ううえで非常に有用であると考え

25



られる。

表 7-1 米国において実施されている GM トウモロコシの隔離ほ場試験の概要

系統	ほ場カ所数	種内品種間変動の範囲を設定するために使用された従来品種
LY038	10 カ所 (2002 年、米国)	4 品種
	17 カ所	
	7 カ所 (2003 年、米国)	4 品種
MON89034	9 カ所 (2004 年、米国)	2004 年 23 品種
	18 カ所	
	9 カ所 (2005 年、米国)	2005 年 Study-1 は 12 品種
	4 カ所 (Study-1)	
	5 カ所 (Study-2)	2005 年 Study-2 は 14 品種
MON87460	8 カ所 (2006 年、米国)	灌漑を十分に行った条件
	9 カ所 (2007 年、米国)	灌漑を十分に行った条件
	4 カ所 (2006/2007 年、チリ)	灌漑を十分に行った条件及び制限した条件 <sup>1)</sup>
	5 カ所 (2007 年、米国)	2 カ所で灌漑を十分に行った条件及び制限した条件 (Study-1)
	31 カ所	3 カ所で灌漑を十分に行った条件及び制限した条件 (Study-2) <sup>2)</sup>
	5 カ所 (2006 年、米国)	一般的灌漑方法に順じた条件
		灌漑を十分に行った条件
		灌漑を十分に行った条件
		灌漑を十分に行った条件
		灌漑を十分に行った条件
	灌漑を十分に行った条件	

<sup>1)</sup> チリの4カ所 (Calera de Tango, Colina, Lumbreras, Quillota) で灌漑を十分に行った条件及び制限した条件の下で評価が行われた。Quillota のほ場は適切な土壌水分管理条件を満たしていないため、このデータは統計処理には含めなかった。

<sup>2)</sup> 米国の3カ所 (カンザス州、ネブラスカ州、テキサス州) で灌漑を十分に行った条件及び制限した条件の下で評価が行われた。テキサス州のほ場は灌漑を十分に行った条件及び制限した条件としての基準を満たす唯一のほ場であった。カンザス州及びネブラスカ州の2カ所では灌漑制限中に降雨があったため、灌漑を十分に行った条件としての基準を満たしているが、灌漑を制限した条件としての基準を満たしていない。このため、カンザス州及びネブラスカ州の灌漑を制限した条件でのデータは統計処理に含めなかった。

表 7-2 日本において実施されている GM トウモロコシの隔離ほ場試験の概要

系統	ほ場カ所数	種内品種間変動の範囲を設定するために使用された従来品種
LY038	1 カ所	
MON89034	1 カ所	過去に実施した GM トウモロコシ系統 [DLL25 系統 (1998 年)、NK603 系統 (2000 年)、MON863 系統 (2000 年)、MON810 系統 (1996, 2001 年)、MON88001 系統 (2002 年)、MON88012 系統 (2002 年)、MON88017 系統 (2002 年)、LY038 系統 (2004 年)、MON89034 系統 (2006 年)、MON87460 系統 (2010 年)、MON87427 系統 (2010 年)] の隔離ほ場試験において、対照として用いられた Non-GM トウモロコシの平均値の最小値と最大値
MON87460	1 カ所	



表 7-3 トウモロコシ及びワタのデータ要求項目における米国と日本との比較

評価項目	USDA <sup>1)</sup>	日本
形態及び生育の特性	✓ <sup>2)</sup>	✓
トウモロコシについて収集されたデータ <sup>3)</sup>	<p>苗立ち数、初期発芽数、花粉落下率 50% までの日数、絹糸抽出率 50% までの日数、緑色保持度、着雌穂高、稈長、落下雌穂数、挫折型倒伏株数、転び型倒伏株数、最終株数、穀粒中の水分含量、植物重</p>	<p>発芽揃い、発芽率、雄穂抽出期、絹糸抽出期、開花日、開花期、稈長、着雌穂高、分けつ数、草型、成熟期、収穫期の地上部重、粒形、粒色</p>
生育初期における低温または高温耐性	✓	✓
成体の越冬または越夏性	✓	✓
花粉の形態及び稔性	✓	✓
トウモロコシについて収集されたデータ	<p>花粉の形態、花粉の生育性、花粉径</p>	<p>花粉の形態、花粉の稔性、花粉のサイズ (目視観察による)</p>
種子の生産量、脱粒性、休眠性及び発芽率	✓	✓
トウモロコシについて収集されたデータ	<p>収量、多数の温度設定における種子発芽率及び休眠率の評価</p>	<p>有効雌穂数、雌穂長、雌穂径、粒列数、一穂着粒数、百粒重、脱粒性の有無、単一温度管理における収穫種子の発芽率</p>
植物体が内部に有し枯死した後に他の植物に影響を与えるもの	✓	✓
根から分泌される他の植物へ影響を与えるもの	✓	✓
根から分泌され土壌微生物に影響を与えるもの	✓	✓
生態学的相互作用 (観察)	✓	✓
交雑性	該当せず	該当せず

1) 米国農務省 (United States Department of Agriculture)

2) ✓は評価が行われている項目を表す。

3) 赤字の評価項目は米国と日本との共通項目。

表 7-4 米国及びチリでの雑草性評価における形態及び生育特性の一例

落下雌穂数 (#/区画)	被験品種		対照品種 <sup>1)</sup>		変動の範囲	
	被験品種	対照品種	被験品種	対照品種	最小値	最大値
LY038 - 米国 (2002)	0.3	0.2	0.2	0.0	0.0	4.0
LY038 - 米国 (2003)	0.3	0.2	0.2	0.0	0.0	15.0
MON89034 - 米国 (2004)	0.1	0.2	0.2	0.0	0.0	1.0
MON89034 - 米国 (2005-1)	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.3
MON89034 - 米国 (2005-2)	1.4	0.9	0.9	0.0	0.0	2.0
MON87460 - チリ (灌漑を十分に 行った条件) <sup>2),3)</sup>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
MON87460 - チリ (灌漑を制限し た条件) <sup>2),3)</sup>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
MON87460 - 米国 (一般的な灌漑 方法に順じた条件) <sup>2)</sup>	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.7

収量 (bu/a)	被験品種		対照品種		変動の範囲	
	被験品種	対照品種	被験品種	対照品種	最小値	最大値
LY038 - 米国 (2002)	104.1	112.9	112.9	11.2	11.2	266.1
LY038 - 米国 (2003)	129.5	129.6	129.6	43.9	43.9	261.4
MON89034 - 米国 (2004)	192.9	191.3	191.3	92.8	92.8	290.8
MON89034 - 米国 (2005-1)	205.5	195.1	195.1	171.0	171.0	220.0
MON89034 - 米国 (2005-2)	126.8	125.7	125.7	31.7	31.7	203.5
MON87460 - チリ (灌漑を十分に 行った条件)	220.7	220.0	220.0	166.7	166.7	248.4
MON87460 - チリ (灌漑を制限し た条件)	114.5*	86.7	86.7	56.4	56.4	167.6
MON87460 - 米国 (一般的な灌漑 方法に順じた条件)	170.2	165.3	165.3	143.6	143.6	213.4

\*被験品種と対照品種との間に統計学的有意差あり ( $p < 0.05$ )。

<sup>1)</sup> LY038 系統には、分離によって得られた Non-GM 個体を対照として使用した。

<sup>2)</sup> MON87460 系統の隔離ほ場試験に使用された 3 種類の土壌水分管理方法：(1) 灌漑を十分にを行った条件、(2) 灌漑を制限した条件、(3) 各栽培地域の一般的な灌漑方法に順じた条件。土壌水分管理方法の詳細は Sammons et al. (2014) の中で報告されている。

<sup>3)</sup> データにばらつきがなかったため統計学的比較は行われなかった。被験品種及び対照品種の平均値が同じため、被験品種と対照品種との間に差異はないと考えられた。

挫折型倒伏株数 (#/区画)	被験品種		対照品種		変動の範囲	
	被験品種	対照品種	被験品種	対照品種	最小値	最大値
LY038 - 米国 (2002)	1.0	1.5	1.5	0.0	0.0	21.0
LY038 - 米国 (2003)	2.0	3.4	3.4	0.0	0.0	25.0
MON89034 - 米国 (2004)	0.8*	2.4	2.4	0.0	0.0	6.0
MON89034 - 米国 (2005-1)	0.1	0.3	0.3	0.0	0.0	2.3
MON89034 - 米国 (2005-2)	9.6	5.4	5.4	0.0	0.0	49.0
MON87460 - チリ (灌漑を十分に 行った条件) <sup>3)</sup>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
MON87460 - チリ (灌漑を制限し た条件) <sup>3)</sup>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
MON87460 - 米国 (一般的な灌漑 方法に順じた条件)	5.5	5.1	5.1	0.3	0.3	7.7

発芽率 (%)	被験品種		対照品種		変動の範囲	
	被験品種	対照品種	被験品種	対照品種	最小値	最大値
LY038	98.5	99.0	99.0	94.0	94.0	100.0
MON89034	94.2	95.3	95.3	78.0	78.0	100.0
MON87460	98.7	98.4	98.4	93.3	93.3	98.0

表 7-5 日本での雑草性評価における形態及び生育特性の一例

粒列数	被験品種	対照品種	変動の範囲 <sup>1)</sup>	
			最小値	最大値
LY038-A	14.7*	15.9	—	—
LY038-B	14.3*	16.9	—	—
MON89034	16.8	16.1	12.3	16.9
MON87460 (灌漑を十分に行った条件)	14.00	13.70	—	—
MON87460 (灌漑を制限した条件)	13.26	12.68	—	—

一穂着粒数	被験品種	対照品種	変動の範囲	
			最小値	最大値
LY038-A	559.7	610.0	—	—
LY038-B	584.1*	725.6	—	—
MON89034	663.6*	592.1	549.2	728.6
MON87460 (灌漑を十分に行った条件)	614.67	559.96	—	—
MON87460 (灌漑を制限した条件)	249.85	159.88	—	—

百粒重 (g)	被験品種	対照品種	変動の範囲	
			最小値	最大値
LY038-A	29.1	28.1	—	—
LY038-B	30.7*	26.6	—	—
MON89034	29.3	30.3	22.3	43.9
MON87460 (灌漑を十分に行った条件)	29.95	30.53	—	—
MON87460 (灌漑を制限した条件)	21.54	20.99	—	—

収穫種子の発芽率 (%)	被験品種	対照品種	変動の範囲	
			最小値	最大値
LY038-A	98.9	96.7	—	—
LY038-B	97.8*	93.3	—	—
MON89034 <sup>2)</sup>	99.4	100.0	86.7	100.0
MON87460 (灌漑を十分に行った条件)	99.50	98.00	—	—

\* 被験品種と対照品種との間に統計学的有意差あり (p<0.05)。

<sup>1)</sup> 参照範囲は過去に実施した GM トウモロコシ系統 [DLL25 系統 (1998 年)、NK603 系統 (2000 年)、MON863 系統 (2000 年)、MON810 系統 (1996、2001 年)、MON88001 系統 (2002 年)、MON88012 系統 (2002 年)、MON88017 系統 (2002 年)、LY038 系統 (2004 年)、MON89034 系統 (2006 年)、MON87460 系統 (2010 年)、MON87427 系統 (2010 年)] の隔離ほ場試験において対照として用いられた Non-GM トウモロコシの平均値の最小値及び最大値から設定した。

<sup>2)</sup> 発芽率については統計学的比較が行われなかった。しかし、発芽率数については統計学的比較が行われており、被験品種と対照品種との間に有意差は認められなかった (データ未掲載)。



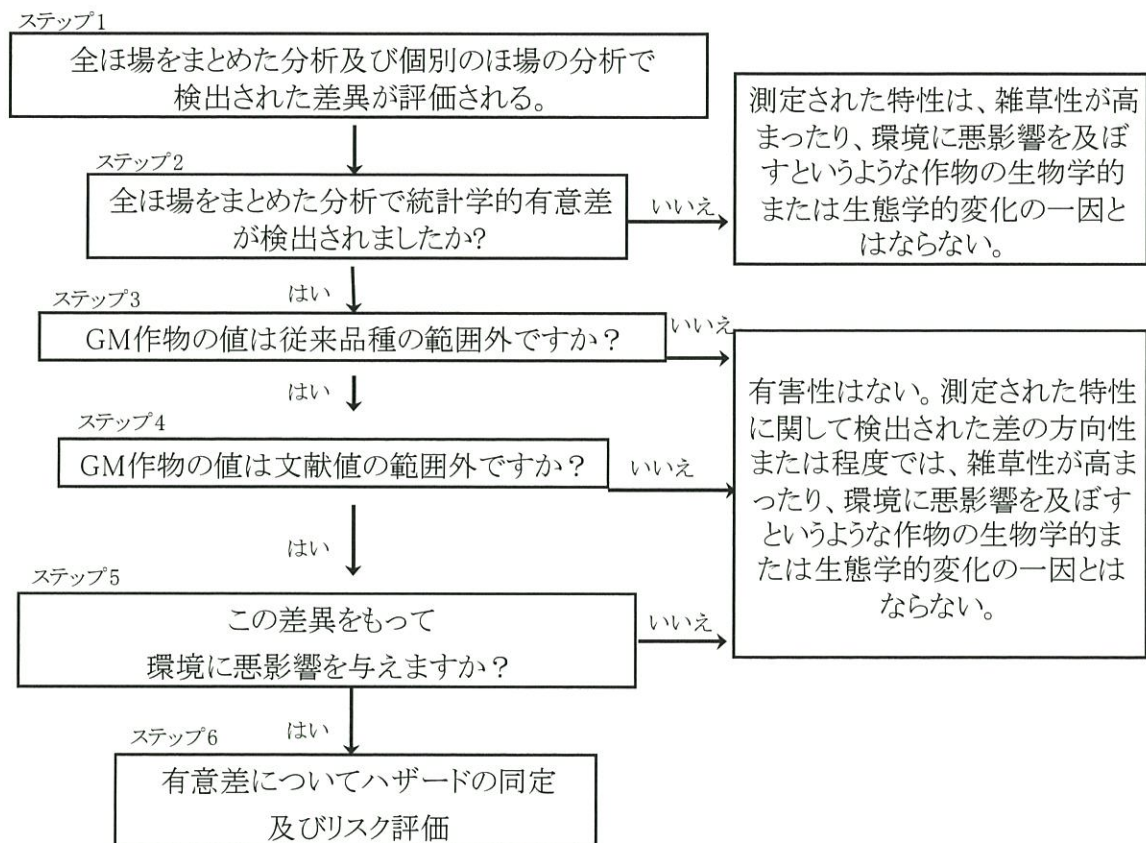


図 7-1 米国における隔離ほ場試験で検出された差異の解釈に関する判定手順 (出典: Horak et al., 2014)

## 第8章 総合考察

### 8-1 日本における GM 作物の隔離ほ場試験の事例

2004 年に日本においてカルタヘナ法のもとで GM 作物の生物多様性に対する影響評価が行われるようになってから既に 12 年が経過しようとしているが、現在までに日本において栽培地を限定されずに栽培できるか、または食品・飼料・加工 (FFP) 用途としての輸入が可能な GM 作物は、隔離ほ場試験を求められないスタック系統を除くと、2015 年 12 月の時点で、アルファルファ 3 系統、カーネーション 8 系統、セイヨウナタネ 9 系統、ダイズ 15 系統、テンサイ 1 系統、トウモロコシ 24 系統、バラ 2 系統、パパイヤ 1 系統、ワタ 14 系統の全 9 作物種、77 系統に達する。

第 2 章では日本モンサント株式会社が過去に隔離ほ場試験を行った 11 系統の GM トウモロコシの中から、主要栽培国で最も広く普及している形質である除草剤耐性と害虫抵抗性 (James, 2014) の形質を持つ 2 系統に加えて、近年開発の進んでいる栄養改変の形質を持つ 1 系統及び乾燥ストレス耐性の形質を持つ 1 系統の計 4 系統の GM トウモロコシ系統を選び (表 2-1)、これら 4 系統の隔離ほ場試験の結果を示した。また上述した 4 系統の GM トウモロコシの日本における隔離ほ場試験の結果に基づいて行われる生物多様性影響評価は、米国農務省 (USDA) が採用している環境リスク評価の手法と同様に、ファミリーの概念を取り入れながら系統ごと (Product base) に評価が行われることを示した。さらに、第 2 章では上述した 4 系統の GM トウモロコシの隔離ほ場試験の結果に加えて、過去に日本モンサント株式会社が隔離ほ場試験を実施した GM トウモロコシ 11 系統の隔離ほ場試験において、対照として用いられた Non-GM トウモロコシの形態及び生育特性並びに種子の生産量に関する評価項目の調査結果に基づく平均値の最小値と最大値を提示した。これらの平均値の最小値と最大値は日本の環境におけるトウモロコシの種内品種間変動の範囲の一つとして考えることができることから (中井ら, 2015)、今後、他の民間企業や研究機関が独自に開発した GM トウモロコシの生物多様性影響評価を行う際には、これらの種内品種間変動の範囲を用いてファミリーに基づく生物多様性影響評価が行われることが期待される。

## 8-2 隔離ほ場試験データの栽培国から輸入国へのトランスポータビリティについて

第2章で述べたように、日本ではカルタヘナ法のもとで国内で隔離ほ場試験が実施され、その結果等を用いて生物多様性影響評価を行うプロセスが確立している。しかし、日本における GM 作物の多様性影響評価も、これまでに蓄積された知見や科学的根拠に基づき、より効率的かつ効果的に実施できる余地があると考えられる。特に、日本では食品・飼料・加工 (FFP) 用途の GM 作物に対して承認を与える場合であっても、国内での隔離ほ場試験が義務付けられているが、これは検討が可能な分野の一つである。日本において GM 作物の商業栽培が予定されていないにもかかわらず、輸送中のこぼれ落ちや、GM 種子が Non-GM 作物の栽培用種子へ混入することを通じて、意図せず GM 作物が生育し、環境に影響を及ぼす可能性に対処するため、GM 作物の開発者には国内での隔離ほ場試験の実施が義務付けられている。現在、食品・飼料・加工 (FFP) 用途のみを目的とする GM 作物の輸入に国内での隔離ほ場試験が義務付けられているのは日本と中国のみである (USDA Global Agricultural Information Network (GAIN), 2013)。第3章では、この問題を以下の3領域について精査し、栽培国 (米国、カナダ、南米諸国など) で得られた GM 作物の隔離ほ場試験データを、日本など輸入国で生物多様性影響評価を行う際に利用するデータのトランスポータビリティについて考察した。

(1) 隔離ほ場試験の目的：目的は GM 作物を使用する環境ごとに GM 作物の特性を可能な限り詳細に把握することではなく、環境リスク評価における評価エンドポイントに関する非意図的有害影響の有無を検証することである。世界的に広く認知・合意されている環境リスク評価における評価エンドポイントは生物多様性の維持、直接的には対象 GM 作物における侵略的雑草性の変動の有無により検証されている。特にトウモロコシやワタのように栽培化過程で雑草性を喪失し、輸入国に近縁野生種が不在の場合には、雑草性の変動の検証が隔離ほ場試験の主目的となる。(2) 宿主作物の雑草性：(1)の結果を受けて主要 GM 作物の雑草性を検討した。一般に作物は栽培化過程で雑草性を喪失し、主要 GM 作物 (トウモロコシ・ワタ・ダイズ・セイヨウナタネ) においてもこの傾向は顕著であった。ま



た、トウモロコシやワタのようなコモディティ作物については日本における雑草化の事例はない。雑草性は多数遺伝子が関与する複雑な複合特性であり、環境条件（土壌・水）の変化により容易に変動することはないと理解されている。したがって、高度に栽培化された宿主作物であれば、栽培国と輸入国間の環境条件が厳密に類似していなくとも、栽培国

5 5 で収集した隔離ほ場試験データを用いて、輸入国で GM 作物が生育した場合の雑草性を十分に評価できると考えられる。(3) 栽培国（輸出国）における隔離ほ場試験データの信頼性：米国と日本の両国ですでに承認されている 3 系統の GM トウモロコシ（LY038 系統、MON89034 系統、MON87460 系統）の隔離ほ場試験データについて比較を行った。その結果、日本の 1 ヶ所・1 年に対し米国は複数ヶ所（17～31）、複数年（2 ヶ年）のデータであり、

10 10 日本の試験基盤を十分に網羅していると判断された。さらに雑草性に関する調査項目は、米国では落下雌穂数、倒伏株数、収量、そして収穫種子の発芽率、日本では種子生産性に関連する形質（粒列数など）や脱粒性、収穫種子の発芽率を導入遺伝子の特性にかかわらず必ず調査している。以上のことから、米国の試験結果は日本と比べてより広域の環境及び生態系で得られたより厳密な試験結果であり（表 7-1）、日本で要求される生態的悪影響

15 15 検証の範囲を十分網羅していると判断される。

上述した 3 点に加えて、第 2 章で述べたように 2015 年 12 月の時点で、スタック系統を除く 77 系統の GM 作物が、日本での隔離ほ場試験を経て、栽培または輸入のための承認を取得している（農林水産省, 2015）。この 77 系統のうち 63 系統（トウモロコシ 23 系統、ワタ 11 系統、ダイズ 14 系統、セイウナタネ 8 系統、アルファルファ 3 系統、バラ 2 系統、

20 20 テンサイ 1 系統、パパイヤ 1 系統）については、米国でも隔離ほ場試験が実施され、無規制栽培の承認がなされている（APHIS, 2015）。これら 63 系統全ての GM 作物に対する隔離ほ場試験の結果から導き出された結論が、日米間で全て一致している事実は、米国などの栽培国で行われた隔離ほ場試験のデータでもって輸入国である日本の環境下での GM 作物の生物多様性影響評価を行うことができることを裏付けている。

25 25 さらに、GM 作物の開発企業は、一般的に何百、何千という形質転換系統を作出し、開発の過程で数系統にまで選抜を行う。この選抜の過程で一定の基準（目的の形質を示して

いる、形態・生育特性に異変が起きていない、導入遺伝子が欠損していないなど) を満たした系統だけが、商品化に向けた開発が続けられ (Prado et al., 2014)、安全性認可を取得するための隔離ほ場試験が実施される。つまり、隔離ほ場試験を行うまでの段階で、GM 作物は既に厳しい選抜の過程を経ており、農業生産性や雑草性に関わる形態・生育特性に異変が起きていないことも確認されている。

以上の点に加えて、栽培国から輸入国への隔離ほ場試験データのトランスポータビリティを考察する際には、GM 作物の両国の環境に対する暴露量の差を考慮することが重要である。リスク評価はハザードと暴露量の二つを考慮しなければならない (リスク=ハザード x 暴露量)。ハザードとは、起こりうる影響 (危険) の具体的内容であるのに対して、暴露量は評価の対象物にハザードがおこる可能性の割合を示している (Roberts et al., 2013)。

GM 作物を栽培した際の環境に与える影響の起こりやすさや、その程度を評価する場合、環境リスク評価では GM 作物の環境への暴露量を 100%と想定する。つまり、暴露量及び影響の可能性は栽培条件下では最大限に見積もられるのである。その一方で、食品・飼料・加工 (FFP) として使用する場合には、環境中に存在する GM 作物は、あったとしてもごく僅かであるため、暴露量は栽培と比べて著しく低くなる (OECD, 2013; Roberts et al., 2013)。

Roberts et al. (2013) は、GM 作物の輸入国での暴露量は極めて低いため、栽培国で行われるような大規模なハザードの特定は行う必要はないとしている。現時点では、食品・飼料・加工 (FFP) としての使用を目的とした GM 作物に、国内での隔離ほ場試験を義務付けているのは、日本と中国のみである (USDA Global Agricultural Information Network (GAIN), 2013)。

EU は GM ダイズ及びセイヨウナタネを、それぞれ主にブラジルとカナダから大量に輸入しているが、暴露量が異なるという理由から、GM 作物の環境リスク評価を輸入の目的と栽培の目的とはっきりと区別して行っている (EFSA Panel on Genetically Modified Organisms (GMO), 2010)。

例えば、輸入のみの申請の際は、作物が栽培される国 (米国や中南米諸国など) で得られた隔離ほ場試験データに基づいて環境リスク評価が行われている。

EU と同様に、韓国も大量の GM 作物を海外から輸入しているが、食品・飼料・加工 (FFP) としての使用を目的としている場合には、国内での隔離ほ場試験を求めている (Rural



Development Administration (RDA), 2014)。

5 以上のことから、筆者は GM トウモロコシ及びワタの隔離ほ場試験データは、導入遺伝子の形質にかかわらず、栽培国から輸入国（例えば米国から日本へ）へのトランスポータビリティがあると結論した。一方、セイヨウナタネやダイズなどのように、比較的高い雑草性を持つ宿主作物や交雑可能な野生種を持つ宿主作物については、引き続き検討を重ねる必要があるが、これらの宿主作物に対しても、栽培国の隔離ほ場試験で得られたデータの大部分は、日本における生物多様性影響評価を行ううえで非常に有用であると考えられる。

10 8-3 GM 作物の安全性を担保しながらも、より効率的で効果的な GM 作物の生物多様性影響評価の実現を目指して

また、近年は次世代の GM 技術として New Plant Breeding Techniques (NPBT) に関する議論が、日本国内に限らず欧州、北米そして南米で活発に行われている。しかし、その議論の中心はこれらの NPBT を用いて育成された植物が GM 作物の範疇に入るのか否かである。この背景には、現在の GM 作物に対して求められる安全性評価のデータがあまりにも膨大でコストもかかることにある。このことから、開発者の多くが NPBT で開発された植物、特に収益性の低い果樹や花卉類が、GM 作物の範疇に入ると判断された場合は、それらが折角生産者や消費者に大きなメリットを与えるものだとしても開発を断念せざるを得ないと考えられている。このような理由から開発者は NPBT により作出された作物にどの程度数の塩基が残存すれば GM 作物の範疇に入るかを議論しているが、これは本来のリスク評価の議論の本質から外れていると筆者は考えている。本来ならば NPBT で開発した作物であれ、GM 作物であれ宿主作物の範疇を超える形質を付与する可能性があると判断されるのであれば、その仮説に基づいた環境リスク評価を行うのが最も合理的であると考ええる。ただ、このような健全な議論を実現するためには、GM 作物であっても一律に厳しい安全性評価を求めるのではなく、生物多様性影響評価であれば第 2 章で述べたように宿主植物が長期間の使用経験があり、発現する蛋白質に対する知見がある程度蓄積されてい

15  
20  
25



る場合は、イベントごとにそれらの知見と経験を考慮した評価を行うことが望まれる。

例えば日本においては、導入された形質にかかわらず、隔離ほ場試験では形態及び生育の特性、生育初期における低温耐性、成体の越冬性、花粉の稔性及びサイズ、種子の生産量、脱粒性、休眠性及び発芽率、有害物質の産生性（後作試験、土壤微生物層試験、鋤込み試験）等の調査が常に求められている。これらの試験データが求められる主な理由は、導入遺伝子からの発現産物による影響評価に加えて、挿入箇所による非意図的影響の評価である。ここで述べる挿入箇所による影響とは、目的遺伝子が植物ゲノムに挿入される際に内在性遺伝子が破壊されたあるいは導入遺伝子の近傍に新たなオープンリーディングフレーム (ORF) が形成された場合のことである。しかし、第 2 章で述べたように導入遺伝子の位置効果等により非意図的にアレロパシー物質等の有害物質を放出した事例は少なくとも本報告で示した一連の GM トウモロコシでは確認されていない。また、トウモロコシを含めて現在までに隔離ほ場試験を終えた全 9 作物種、77 系統の GM 作物においても、導入遺伝子の位置効果等により、非意図的にアレロパシー物質等の有害物質が産生されたという結果はこれまでに確認されていない。

さらに、トウモロコシの栽培起源は今から 9,000 年前とされており (OECD, 2003)、現在に至るまでの従来育種による品種改良の過程でトウモロコシのゲノム中では、トランスポゾンによる DNA 断片の転移などが頻繁に起こっていると考えられる。しかし、これまでのところ従来育種による品種改良によってもトウモロコシから非意図的にアレロパシー物質等の有害物質が産生された報告はない。これらのことから、トウモロコシのように長期間の使用経験があり、有害物質の産生性が報告されていない宿主作物においては、導入遺伝子の挿入箇所による影響等により非意図的な形態の変化等を示す可能性はあっても、有害物質を突然産生するような可能性は、従来育種による品種改良以上に高まることはないと考えられた。

以上のことから、長期間の使用経験があり、有害物質の産生性が報告されていない宿主植物で、導入遺伝子についても雑草性に直接関わるような形質や有害物質の産生性に関与しないことが明らかな場合は、その科学的知見を学術論文あるいはデータベース等の引用

で示すことで評価を行うことが可能になると考えられる。このように GM 作物の温室等での試験結果を知見として蓄積し、類似した形質を持つ GM 作物を評価する際に用いることは、OECD により提唱されているファミリーリティの概念とも一致している (OECD, 2005)。

それでも最低限の非意図的影響を評価するのであれば、第3章で述べたように隔離ほ場試験を実施する目的を明確にしたうえで行う必要がある。例えば、雑草性が低く、交雑可能な野生種が存在しない宿主作物においては、GM 作物の雑草性が高まっていないかを確認することが隔離ほ場試験の最も重要な目的となる。GM 作物の雑草性に関する形質は、種子の休眠性、種間で競合する能力、短距離及び遠距離のいずれでも種子散布できる適応性、好ましい環境における高い種子生産性、全栽培地域での高い種子生産性など、多くの一般雑草にみられる一連の特性はすでに明らかとなっていることから (Anderson, 1996; Lingenfelter and Hartwig, 2003)、これらに焦点を絞った試験を行えば良いと考える。宿主作物のファミリーリティが欠如している場合、あるいは隔離ほ場試験での評価において、GM 作物と対照の Non-GM 作物との間に生存及び自生に関する特性に実質的な差があることが示された場合のみ、普段の隔離ほ場試験で収集される以上のデータを追加で収集する必要がある (Roberts et al., 2013)。

さらに将来的には「雑草リスク評価 (Weed Risk Assessment: WRA)」の考え方を導入することにより、宿主作物と導入する遺伝子の知見から GM 作物の生物多様性影響評価をほ場試験を行わずに評価できる可能性も考えられる (Keese et al., 2014)。WRA とは海外から持ち込まれる植物について雑草化の恐れの有無を評価することであり、その評価によっては必要に応じて持ち込みを制限する、あるいはすでに進入した強害雑草を防除する優先順位を決定する制度が、すでに米国、オーストラリア及びニュージーランド等で運用されている (Nishida et al., 2009)。具体的には、あらかじめ宿主作物について、気候への適応性、他国での雑草害の状況、雑草性や侵入性にかかわる生物学的・生態学的特性に関する 49 の質問をし、文献やウェブ情報に基づいて答えることで WRA スコアを算出し、その作物が雑草化しやすいかを評価しておく。GM 作物については、そこに導入遺伝子の形質が付与されることで、WRA スコアが侵略性のある雑草のレベルまで上がるかで、リスク評価



が行えると考えられる (Keese et al., 2014)。

#### 8-4 周辺の生態系に与えるプラスの影響も考慮した包括的な議論

GM 作物の生物多様性影響評価を行う際は、リスクのみに焦点を当てられているが、仮  
5 に GM 作物を栽培することによりある特定の種に影響を与える可能性が示唆された場合でも、GM 作物を栽培することで周辺の生態系に与えるプラスの影響についても十分認識した上で総合的な判断がなされるのが理想的と考えられる。例えば GM ダイズの生物多様性影響評価を日本で行う際は、近縁野生種であるツルマメに対する遺伝子浸透が一番の懸念として議論される。しかし、Bt 蛋白質を発現する Bt ダイズは、特定の標的害虫が摂食した  
10 た場合にのみ殺虫活性を示すが、その他の非標的昆虫に対しては殺虫作用を示さない。農地には、農作物に食害を与える害虫の他に、害虫を捕食するテントウムシや、花粉を媒介して受粉を促すハチなどの益虫も生息している。多くの殺虫剤は、標的の害虫だけではなくこれらの有用昆虫にも作用しているため、食害する標的昆虫のみに殺虫活性を示す Bt  
15 ダイズは、これらの殺虫剤の散布量を大幅に軽減できるというプラスの影響がある。実際に、英国のコンサルティング会社 PG エコノミクス社の報告によると、1996 年以降の GM 作物の普及により、殺虫剤や除草剤などの農薬使用量 (有効成分換算) が約 55 万トン削減され、農作業により生じる二酸化炭素の排出量も 2,800 万トン削減されたと報告されている (Brookes and Barfoot, 2015)。このように GM 作物の生物多様性影響評価を行う際に、栽培に伴う環境や生態系に与えるプラスの影響も考慮することによって、より包括的な生物  
20 多様性影響評価が可能になると考えられる。

最後に、GM 作物の生物多様性影響評価は、これまでに蓄積した知見と科学的根拠に基づいて、効率的かつ効果的に行うことが重要である (Fedoroff et al., 2010; Raybould, 2007)。今回、筆者が提案した GM 作物の隔離ほ場試験データのトランスポートビリティは、GM  
25 作物を開発しても、栽培/輸入される全ての国々で、それらの隔離ほ試験を実施する財政的な余裕の無い研究機関や、民間企業に対しても有益であると考えられる。そして、これま



で蓄積した知見及び科学的根拠に基づき、効率的で効果的な GM 作物の生物多様性影響評価を行うことで、GM 作物の安全性を十分に担保しながらも、GM 作物の研究開発をさらに発展させることができると考えられる。

## 謝辞

本研究の計画、遂行並びに本論文の取りまとめにあたり、筑波大学環境系教授 大澤 良博士には終始懇切丁寧なご指導と多大な助言をいただきました。ここに深甚なる謝意を表します。

本論文の取りまとめに関しまして、筑波大学生命環境系教授 林久喜博士、同助教 吉岡洋輔博士、同准教授 氏家清和博士、准教授 田中淳一博士には、懇切丁寧なご指導と的確な助言をいただきました。ここに謹んで感謝の意を表します。

10 東邦大学理学部生物学科講師 下野 綾子博士には本研究の計画、遂行にあたり多大なご協力とご助言をいただきました。心より御礼申し上げます。

日本モンサント株式会社 干川奏氏には、本論文の取りまとめにあたり多大なご協力とご助言をいただきました。心より御礼申し上げます。

15 日本モンサント株式会社 代表取締役 山根精一郎博士には社会人特別選抜として本論文に取り組むことをご承諾いただき、あらゆる面でご支援いただきました。心より御礼申し上げます。

この全ての皆様のご協力とご助言なくしては、本研究を遂行することはできませんでした。この場をお借りして、改めて厚く御礼申し上げます。

## 引用文献

Anderson, W.P. 1996. Weed ecology. Pages 27-38 in Weed Science: Principles and Applications. Third Edition. West Publishing Company, St. Paul, Minnesota.

APHIS. 2015. Petitions for Determination of Nonregulated Status. [http://www.aphis.usda.gov/biotechnology/petitions\\_table\\_pending.shtml](http://www.aphis.usda.gov/biotechnology/petitions_table_pending.shtml) [Accessed December 28].

Baker, H.G. 1965. Characteristics and Modes of Origin of Weeds. Pages 147-168 in The genetics of colonizing species. H.G. Baker and G.L. Stebbins (eds.). Academic Press, New York and London.

Baker, H.G. 1974. The evolution of weeds. *Annu Rev Ecol Syst* 5:1-24.

Beard, B.H. and P.F. Knowles. 1971. Frequency of cross-pollination of soybeans after seed irradiation. *Crop Science* 11:489-492.

Brookes, G. and P. Barfoot. 2015. Global income and production impacts of using GM crop technology 1996–2013. *GM Crops & Food* 6:13-46.

Castiglioni, P., D. Warner, R.J. Bensen, D.C. Anstrom, J. Harrison, M. Stoecker, M. Abad, G. Kumar, S. Salvador, R. D'Ordine, S. Navarro, S. Back, M. Fernandes, J. Targolli, S. Dasgupta, C. Bonin, M.H. Luethy and J.E. Heard. 2008. Bacterial RNA Chaperones Confer Abiotic Stress Tolerance in Plants and Improved Grain Yield in Maize under Water-Limited Conditions. *Plant Physiology* 147:446-455.

CFIA. 2005. The biology of *Brassica napus* L. (Canola/rapeseed). BIO1994-09. Canadian Food Inspection Agency, Plant Biosafety Office, Ottawa, Ontario. <http://www.inspection.gc.ca/english/plaveg/bio/dir/dir9409e.shtml> [Accessed February 18, 2015].

Chandler, S. and J.M. Dunwell. 2008. Gene Flow, Risk Assessment and the Environmental Release of Transgenic Plants. *Critical Reviews in Plant Sciences* 27:25-49.

Coppens d'Eeckenbrugge, G. and J.-M. Lacape. 2014. Distribution and Differentiation of Wild, Feral, and Cultivated Populations of Perennial Upland Cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in



Mesoamerica and the Caribbean. PLoS One 9:e107458.

Crawley, M.J. and S.L. Brown. 1995. Seed limitation and the dynamics of feral oilseed rape on the M25 motorway. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences 259:49-54.

Crawley, M.J., R.S. Hails, M. Rees, D. Kohn and J. Buxton. 1993. Ecology of transgenic oilseed rape in natural habitats. Nature 363:620-623.

EFSA Panel on Genetically Modified Organisms (GMO). 2010. Guidance on the environmental risk assessment of genetically modified plants. EFSA Journal 8:1879 [1111pp].

European Commission. 2000. Opinion regarding submission for placing on the market of Glufosinate tolerant oilseed rape transformation event liberator PHOE 6/AC notified by the Hoechst schering Agrevo Company [Now AVENTIS CROPSCIENCE] (Notification C/DE/98/6) (Opinion adopted by written procedure following the SCP meeting of 30 November 2000). European Commission Scientific Committee on Plants-Genetically Modified Organisms, Paris, France. [http://ec.europa.eu/food/fs/sc/scp/out88\\_gmo\\_en.html](http://ec.europa.eu/food/fs/sc/scp/out88_gmo_en.html) [Accessed February 18, 2015].

Fedoroff, N.V., D.S. Battisti, R.N. Beachy, P.J.M. Cooper, D.A. Fischhoff, C.N. Hodges, V.C. Knauf, D. Lobell, B.J. Mazur, D. Molden, M.P. Reynolds, P.C. Ronald, M.W. Rosegrant, P.A. Sanchez, A. Vonshak and J.K. Zhu. 2010. Radically Rethinking Agriculture for the 21st Century. Science 327:833-834.

Galinat, W.C. 1988. The origin of corn. Pages 1-31 in Corn and Corn Improvement - Agronomy Monograph no.18. 3rd Edition. G. F. Sprague and J. W. Dudley (eds.). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison, WI.

Garcia-Alonso, M., P. Hendley, F. Bigler, E. Mayeregger, R. Parker, C. Rubinstein, E. Satorre, F. Solari and M. McLean. 2014. Transportability of confined field trial data for environmental risk assessment of genetically engineered plants: a conceptual framework. Transgenic Research:1-17.

Hall, L.M., M.H. Rahman, R.H. Gulden and A.G. Thomas. 2005. Volunteer oilseed rape - Will herbicide-resistance traits assist ferality? Pages 59-79 in Crop Ferality and Volunteerism. J. Gressel (ed.). CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida.

服部保 (2002) セイタカアワダチソウ. 外来種ハンドブック 地人書館 東京 p.196.

Horak, M., E. Rosenbaum, D. Kendrick, B. Sammons, S. Phillips, T. Nickson, R. Dobert and T. Perez. 2014. Plant characterization of Roundup Ready 2 Yield® soybean, MON 89788, for use in ecological risk assessment. *Transgenic Research*:1-13.

Horak, M.J., E.W. Rosenbaum, C.L. Woodrum, A.B. Martens, R.F. Mery, J.T. Cothren, J.A. Burns, T.E. Nickson, T.A. Pester, C. Jiang, J.L. Hart and B. Sammons. 2007. Characterization of Roundup Ready Flex Cotton, 'MON 88913', for Use in Ecological Risk Assessment: Evaluation of Seed Germination, Vegetative and Reproductive Growth, and Ecological Interactions. *Crop Sci.* 47:268-277.

James, C. 2014. Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2014. ISAAA Brief No. 49. ISAAA, Ithaca, NY.

Keeler, K.H. 1989. Can Genetically Engineered Crops Become Weeds? *Nat Biotech* 7:1134-1139.

Keese, P.K., A.V. Robold, R.C. Myers, S. Weisman and J. Smith. 2014. Applying a weed risk assessment approach to GM crops. *Transgenic Research* 23:957-969.

Kiang, Y.T., Y.C. Chiang and N. Kaizuma. 1992. Genetic diversity in natural populations of wild soybean in Iwate Prefecture, Japan. *Journal of Heredity* 83:325-329.

菊池一徳 (1987) トウモロコシの起源 伝播とアメリカ大陸におけるトウモロコシ トウモロコシの生産と利用. 光琳 東京 p239.

国土交通省 (2015) 河川環境データベース.

[http://mizukoku.nilim.go.jp/ksnkankyo/01/index.files/map\\_sch.jsp#](http://mizukoku.nilim.go.jp/ksnkankyo/01/index.files/map_sch.jsp#). [Accessed February 18 2015]

Lingenfelter, D.D. and N.L. Hartwig. 2003. Introduction to weeds and herbicides. Pennsylvania State University Agricultural Research and Cooperative Extension, University Park, Pennsylvania.

Lu, B.-R. 2008. Transgene Escape from GM crops and Potential Biosafety Consequences: An Environmental Perspective. *Collection of Biosafety Reviews* 4:66-141.

丸山寛治 (1981) トウモロコシの品種生態. 畑作全書 雑穀編 I 品種の基本特性 農山漁村文化協会 東京 pp. 83-89.

Monsanto Company. 2004. Petition for Determination of Nonregulated Status for Lysine Maize LY038. [http://www.aphis.usda.gov/brs/aphisdocs/04\\_22901p.pdf](http://www.aphis.usda.gov/brs/aphisdocs/04_22901p.pdf) [Accessed November 13].

Monsanto Company. 2006. Petition for the Determination of Non-Regulated Status for MON 89034. [http://www.aphis.usda.gov/brs/aphisdocs/06\\_29801p.pdf](http://www.aphis.usda.gov/brs/aphisdocs/06_29801p.pdf) [Accessed November 13].

Monsanto Company. 2009. Petition for the Determination of Non-Regulated Status for MON 87460. [http://www.aphis.usda.gov/brs/aphisdocs/09\\_05501p.pdf](http://www.aphis.usda.gov/brs/aphisdocs/09_05501p.pdf) [Accessed May 28].

Nickson, T.E. and M.J. Horak. 2006. Assessing Familiarity: The role of Plant Characterization. Pages 76-80 in Proceedings of the Ninth International Symposium on the Biosafety of Genetically Modified Organisms, Jeju Island, Korea.

中井秀樹 (2003) アブラナ科. 日本の帰化植物 清水建美(編) 平凡社 東京 pp.80-96.

中井秀一 干川奏 山根精一郎 下野 綾子 大澤 良 (2015) 日本における隔離ほ場試験による遺伝子組換えトウモロコシの生物多様性影響評価の実例. 育種学研究 17 (1):1-15.

日本版バイオセーフティクリアリングハウス (2013) 「遺伝子組換えセイヨウナタネによる影響監視調査の概要」  
<http://www.bch.biodic.go.jp/download/natane/H25.3.26natane.pdf> [Accessed November 13 2015]

日本版バイオセーフティクリアリングハウス (2015a). <http://www.bch.biodic.go.jp/>. [Accessed December 24 2015]

日本版バイオセーフティクリアリングハウス (2015b) 生物多様性への影響の評価.  
[http://www.bch.biodic.go.jp/cartagena/s\\_05.html](http://www.bch.biodic.go.jp/cartagena/s_05.html) [Accessed November 13 2015]

日本モンサント株式会社 (2006) Outline of the Biological Diversity Risk Assessment Report for MON88017. [http://www.bch.biodic.go.jp/download/en\\_lmo/MON88017enRi.pdf](http://www.bch.biodic.go.jp/download/en_lmo/MON88017enRi.pdf) [Accessed December 24 2015]

日本モンサント株式会社 (2007) Outline of the Biological Diversity Risk Assessment Report for LY038. [http://www.bch.biodic.go.jp/download/en\\_lmo/LY038enRi.pdf](http://www.bch.biodic.go.jp/download/en_lmo/LY038enRi.pdf) [Accessed December 24 2015]



日本モンサント株式会社 (2008) Outline of the Biological Diversity Risk Assessment Report for MON89034. [http://www.bch.biodic.go.jp/download/en\\_lmo/MON89034\\_2008enRi.pdf](http://www.bch.biodic.go.jp/download/en_lmo/MON89034_2008enRi.pdf) [Accessed December 24 2015]

日本モンサント株式会社 (2012) Outline of the Biological Diversity Risk Assessment Report for MON87460. [http://www.bch.biodic.go.jp/download/en\\_lmo/H24\\_2\\_7\\_kansoutoumorokoshi\\_risk.pdf](http://www.bch.biodic.go.jp/download/en_lmo/H24_2_7_kansoutoumorokoshi_risk.pdf) [Accessed December 24 2015]

日本雑草学会(編) (1991) 第II編 雑草名. 改訂・雑草学用語集 日本雑草学会 東京 p. 67.

沼田真 浅野貞夫 奥田重俊 吉沢長人 桑原義晴 岩瀬徹 (1975) 新版・日本原色雑草図鑑. 沼田真人・吉沢長人 (編) 全国農村教育協会 東京 p. 107.

農林水産省 (2007) 農林水産大臣がその生産又は流通を所管する遺伝子組換え植物に係る第一種使用規程の承認の申請について (通知).

[http://www.bch.biodic.go.jp/download/law/notification\\_maff\\_191210\\_plant.pdf](http://www.bch.biodic.go.jp/download/law/notification_maff_191210_plant.pdf) [Accessed November 16 2015]

農林水産省 (2011a) 「平成21年度遺伝子組換え植物実態調査」の結果について. 平成23年1月7日公表

[http://www.maff.go.jp/j/syouan/nouan/carta/c\\_data/pdf/21kekka.pdf](http://www.maff.go.jp/j/syouan/nouan/carta/c_data/pdf/21kekka.pdf) [Accessed November 13 2015]

農林水産省. (2011b) 「平成 22 年度遺伝子組換え植物実態調査」の結果について. 平成 23 年 10 月 14 日公表

[http://www.maff.go.jp/j/syouan/nouan/carta/c\\_data/pdf/22\\_natane.pdf](http://www.maff.go.jp/j/syouan/nouan/carta/c_data/pdf/22_natane.pdf) [Accessed November 13 2015]

農林水産省 (2012) 「平成 23 年度遺伝子組換え植物実態調査」の結果について. 平成 24 年 9 月 12 日公表

<http://www.maff.go.jp/j/press/syouan/nouan/pdf/120912-02.pdf> [Accessed November 13 2015]

農林水産省 (2013) 「平成24年度遺伝子組換え植物実態調査」の結果について. 平成25年9月24日公表

[http://www.maff.go.jp/j/syouan/nouan/carta/c\\_data/pdf/24\\_kekka.pdf](http://www.maff.go.jp/j/syouan/nouan/carta/c_data/pdf/24_kekka.pdf) [Accessed November 13 2015]

農林水産省 (2014a) 農林水産植物種類別審査基準「とうもろこし種審査基準」. 平成 26 年 2 月公表

<http://www.hinsyu.maff.go.jp/info/sinsakijun/kijun/1667.pdf>. [Accessed November 16 2015]

農林水産省 (2014b) 「飼料用トウモロコシの流通・加工実態調査」結果報告書. 平成 26 年 3 月公表 <http://www.maff.go.jp/j/press/syouan/nouan/pdf/140326-01.pdf>. [Accessed November 13 2015]

農林水産省 (2015) カルタヘナ法に基づき第一種使用規程を承認した遺伝子組換え農作物一覧. (平成 27 年 12 月 1 日現在)  
[http://www.maff.go.jp/j/syouan/nouan/carta/torikumi/pdf/list02\\_20151201.pdf](http://www.maff.go.jp/j/syouan/nouan/carta/torikumi/pdf/list02_20151201.pdf). [Accessed December 24 2015]

農林水産省消費・安全局長 農林水産省農林水産技術会議事務局長 林野庁長官 環境省自然環境局長 (2014) 「農林水産大臣がその生産又は流通を所管する遺伝子組換え植物に係る第一種使用規程の承認の申請について」の一部改正について. 平成 26 年 12 月 5 日付け [http://www.maff.go.jp/j/syouan/nouan/carta/c\\_data/notice/pdf/01\\_tree\\_20141205.pdf](http://www.maff.go.jp/j/syouan/nouan/carta/c_data/notice/pdf/01_tree_20141205.pdf) [Accessed November 13 2015]

Nishida, T., N. Yamashita, M. Asai, S. Kurokawa, T. Enomoto, P. Pheloung and R. Groves. 2009. Developing a pre-entry weed risk assessment system for use in Japan. *Biological Invasions* 11:1319-1333.

OECD. 1993. *Safety Considerations for Biotechnology: Scale-Up of Crop Plants*. Organisation for Economic Cooperation and Development, Paris.

OECD. 1997. Consensus document on the biology of *Brassica napus* L. (oilseed rape). Series on Harmonization of Regulatory Oversight in Biotechnology No. 7. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, France.

OECD. 2000. Consensus document on the biology of *Glycine max* (L.) merr. (soybean). ENV/JM/MONO(2000)9. Series on Harmonization of Regulatory Oversight in Biotechnology No.15. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, France.

OECD. 2003. Consensus document on the biology of *Zea mays* subsp. *mays* (Maize). ENV/JM/MONO(2003)11. Series on Harmonisation of Regulatory Oversight in Biotechnology No.27. Organisation of Economic Co-operation and Development, Paris, France.

OECD. 2005. An introduction to the biosafety consensus documents of OECD's working group for harmonisation in biotechnology. ENV/JM/MONO(2005)5. Series on Harmonisation of Regulatory

Oversight in Biotechnology No.32.

OECD. 2008. Consensus document on the biology of cotton (*Gossypium* spp.) ENV/JM/MONO(2008)33. Series on Harmonisation of Regulatory Oversight in Biotechnology No.45. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, France.

OECD. 2013. Low Level Presence of Transgenic Plants in Seed and Grain Commodities- Environmental Risk/Safety Assessment, and Availability and Use of Information Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Paris. Low Level Presence of Transgenic Plants in Seed and Grain Commodities- Environmental Risk-Safety Assessment, and Availability and Use of Information.pdf.

小川潔 (2002) 外来種タンポポ. 外来種ハンドブック 地人書館 東京 p.192.

OGTR. 2008. The biology of *Gossypium hirsutum* L. and *Gossypium barbadense* L. (cotton). Australian Government Department of Health and Ageing, Office of the Gene Technology Regulator, Canberra, Australia.

大澤良 下野綾子 (2012) 遺伝子組換え植物の環境影響評価の現状と今後の課題. 月刊バイオインダストリー 8月号 12-18.

Prado, J.R., G. Segers, T. Voelker, D. Carson, R. Dobert, J. Phillips, K. Cook, C. Cornejo, J. Monken, L. Grapes, T. Reynolds and S. Martino-Catt. 2014. Genetically Engineered Crops: From Idea to Product. Annual Review of Plant Biology 65:769-790.

Qaim, M. 2009. The Economics of Genetically Modified Crops. Annual Review of Resource Economics 1:665-694.

Radosevich, S., J. Holt and C. Ghersa. 1997. Plant demography and population dynamics. Weed ecology: implications for management. 2nd Edition. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Raybould, A. 2007. Ecological versus ecotoxicological methods for assessing the environmental risks of transgenic crops. Plant Science 173:589-602.



Raybould, A. 2010. The bucket and the searchlight: formulating and testing risk hypotheses about the weediness and invasiveness potential of transgenic crops. *Environ Biosafety Res* 9:123-133.

Raybould, A., L.S. Higgins, M.J. Horak, R.J. Layton, N.P. Storer, J.M. De la Fuente and R.A. Herman. 2012. Assessing the ecological risks from the persistence and spread of feral populations of insect-resistant transgenic maize. *Transgenic Research* 21:655-664.

Roberts, A., Y. Devos, A. Raybould, P. Bigelow and A. Gray. 2013. Environmental risk assessment of GE plants under low-exposure conditions. *Transgenic Research*.

Rural Development Administration (RDA). 2014. Consolidated Notice for Transboundary Movement, etc. of Living Modified Organisms. [http://www.biosafety.or.kr/03\\_data/001/통합고시.pdf](http://www.biosafety.or.kr/03_data/001/통합고시.pdf) [Accessed May 28].

Sammons, B., J. Whitsel, L.G. Stork, W. Reeves and M. Horak. 2014. Characterization of Drought-Tolerant Maize MON 87460 for Use in Environmental Risk Assessment. *Crop Sci.* 54:719-729.

清水矩宏 森田弘彦 廣田伸七 (2001) アブラナ科. 日本帰化植物写真図鑑 全国農村教育協会 東京 pp.90-91, 110.

下野綾子 (2015) 遺伝子組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): 19-25.

田部井豊 (2010) 遺伝子組換え植物の利用における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 (カルタヘナ法) の概要と生物多様性影響評価. 日本農薬学会誌 35:145-150.

角田重三郎 (2001) ナタネ ナタネの起源と特性 I 原産と来歴. 転作全書 3 雑穀 農山漁村文化協会 東京 pp.283-288.

U.S. Environmental Protection Agency. 1998. Guideline for ecological risk assessment. Risk Assessment Forum, Washington DC.

USDA Global Agricultural Information Network (GAIN). 2013. Japan Agricultural Biotechnology Annual.

[http://gain.fas.usda.gov/Recent%20GAIN%20Publications/Agricultural%20Biotechnology%20Annual\\_Tokyo\\_Japan\\_8-27-2013.pdf](http://gain.fas.usda.gov/Recent%20GAIN%20Publications/Agricultural%20Biotechnology%20Annual_Tokyo_Japan_8-27-2013.pdf) [Accessed May 9].

與語靖洋 (2010) 遺伝子組換え作物の第一種使用における生物多様性影響評価の進め方. 日本農薬学会誌 35 (3):377-382.