

欧州農業における遺伝子組換え作物、一般栽培作物および有機栽培作物の共存のためのシナリオ

誌名	農業環境技術研究所資料
ISSN	09127542
著者名	欧州委員会共同研究センター予測技術研究所
発行元	農業環境技術研究所
巻/号	27号
掲載ページ	p. 1-106
発行年月	2003年9月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



農業環境技術研究所資料
第27号

欧州農業における遺伝子組換え作物、一般栽培作物および
有機栽培作物の共存のためのシナリオ

欧州委員会共同研究センター予測技術研究所 著
廉澤 敏弘・中谷 敬子 訳
(企画調整部研究交流科)

独立行政法人
農業環境技術研究所
(平成15年9月)

農業環境技術研究所資料 第27号

審 査 委 員 会

- 委員長 三田村 強 (理事)
- 副委員長 清野 裕 (企画調整部長)
- 委員 長 岡 進 一 (情報資料課長)
- ” 林 陽 生 (地球環境部長)
- ” 岡 三 徳 (生物環境安全部長)
- ” 今 井 秀 夫 (化学環境部長)
- ” 上 沢 正 志 (農業環境インベントリーセンター長)
- ” 上 路 雅 子 (環境化学分析センター長)

Scenarios for co-existence of genetically modified,
conventional and organic crops
in European agriculture

欧州農業における遺伝子組換え作物、
一般栽培作物および
有機栽培作物の共存のためのシナリオ

欧州委員会 (European Commission)
共同研究センター (Joint Research Centre)
予測技術研究所 (Institute for Prospective Technological Studies)

F . Angevin , N . Colbach, J . -M . Meynard, C . Roturier (INRA, フランス)
J . Sweet (NIAB, 英国)
A . Philp (CEST, 英国)
K . Menrad, M . Menrad, S . Worner (ISI, ドイツ)
J . Kilpatrick (ADAS, 英国)
L . Bonfini, G . Van den Eede (IHCP-JRC, イタリア)
によって行われた調査・研究をもとに、

Anne-Katrin Bock , Karine Lheureux , Monique Libeau-Dulos , Hans Nilsagård ,
Emilio Rodriguez-Cerezo (IPTS-JRC)
が作成した総合報告

2002年 5 月

欧州委員会共同研究センター
報告 EUR 20394EN

廉 澤 敏 弘*・中 谷 敬 子* 訳

First published in English as
*Scenarios for co-existence of genetically modified, conventional and
organic crops in European Agriculture*
by the Office for Official Publications of the European Communities (2002)
© European Communities, 2002

Japanese translation : © National Institute for Agro-Environmental Sciences (NIAES) 2003

Responsibility for the translation lies entirely with
the National Institute for Agro-Environmental Sciences (NIAES)

本書は欧州共同体公式刊行物オフィスから
*Scenarios for co-existence of genetically modified, conventional and
organic crops in European Agriculture*
として英語で出版された (2002)
© 欧州共同体 , 2002

日本語訳 : © 独立行政法人農業環境技術研究所 (NIAES) 2003

日本語訳の責任はすべて独立行政法人農業環境技術研究所 (NIAES) にある。

はじめに

欧州農業における遺伝子組換え（Genetically Modified：GM）作物の商業栽培が増加すると、非GM作物の中へのGM作物の非意図的な混入が生じることになるだろう。2種類の作物を分離しておく必要性に配慮しながら、欧州農業においてGM作物と非GM作物を共存させることが要求されている。

2000年5月に、農業総局は、共同研究センター（Joint Research Centre：JRC）に、欧州農業におけるGM作物、一般栽培作物および有機栽培作物の共存に関する、農学および経済学の側面の研究を要請した。この研究は、共同研究センター全体の事業として、おもに欧州科学技術調査ネットワーク（European Science and Technology Observatory：ESTO）を通じた外部専門家の協力を得て開始された。

この総合報告書は、それぞれ異なる研究所がかかわって実施された6つの調査研究の成果を各調査研究に基づいて示したものである。

- 予測される混入リスクの解析
国立農業植物研究所（NIAB）、ケンブリッジ、英国
Jeremy Sweet
- 農業活動に必要な調整の解析
国立農業研究所（INRA）、パリ、フランス
Frederique Angevin, Nathalie Colbach, Jean Mare Meynard, Christophe Roturier
- 現行の分離方法の概要
科学技術開発センター（CEST）、ロンドン、英国
Alastair Philp
- 混入時の経済的損失の解析
フラウンホーファー システム新技術研究所（ISI）、カールスルーエ、ドイツ
Klaus Menrad, Martina Menrad, Stefan Wörner
- 非GM作物中GMOの農家レベルでのモニタリング
ADAS コンサルタント社、ウルヴァーハンプトン、英国
John Kilpatrick, Simon Tuner
- GMOの検出・定量技術のレビュー
保健・消費者保護研究所（IHCP）、共同研究センター（JRC）
Guy Van den Eede, Laura Bonfini

本報告書の作成、経済分析および研究の調整作業は、共同研究センター予測技術研究所（IPTS）の、Anne-Katrin Bock, Karine Lheureux, Monique Libeau-Dulos, Hans Nilsagård, および Emilio Rodriguez-Cerezo によって行われた。

IPTS は、JRC の各研究所の協力、および他の欧州委員会の部局（農業総局、企業総局、環境総局、保健・消費者保護総局）の支援や助言に感謝するが、内容についての責任は IPTS のみにある。

2002年5月、セビリアにて

Per Sørup

結 論

消費者、食品・飼料産業者と小売業者は、遺伝子組換え生物 (GMO) 由来の生産物と非 GMO 由来の生産物とを適切なレベルで選択可能にすることを求めている。しかし、さまざまな農業生産様式は、本来区分されるものではない。EU 農業における (現在は最小の) GM 作物のシェアが増加すると、非 GM 作物 (一般栽培作物*と有機栽培作物) との農家レベルあるいは地区レベルでの共存の可能性について疑問が生じる。そのいくつかは、農学的、経済学的な疑問であり、この報告ではこれらを扱っている。

* (訳注) 本文中で一般栽培作物 (conventional crops) は、非 GM 作物 (non-GMO crops) のうち、有機栽培作物 (organic crops) 以外のものをさす。

現在の農業活動のままで GM 作物のシェアが10%または50%に増加すると、有機栽培作物あるいは一般栽培作物への GM 作物の非意図的な混入はどの程度になるのか？

GM 品種が入手できる3つの作物 (種子生産用のナタネ、飼料用トウモロコシと食用のジャガイモ) について、また EU 農業の多様な生産基盤をカバーするように設定した複数の農家タイプ (有機栽培農家と一般栽培農家) について研究を実施した。地区内の GM 作物のシェアを10%または50%と想定して、作物と農家のすべての組合せを検討した。50%のシェアは、すぐに GM 作物を採用した国の状況 (たとえば、カナダでの現在の GM ナタネのシェアは54%) を想定しており、10%という数字のほうは、EU でのゆっくりとした組換え作物採用のシナリオを表している。

これらのシナリオにおいて、非 GM 作物の中に GM 作物が非意図的に混入すると予想される程度を、コンピュータ・モデリングと専門家の意見とを組み合わせて推定した。この推定結果は、相対値として信頼できる (言いかえると、農業活動の変更の影響を予測するには有用である) が、現地データによるモデルの調整が十分ではないため、絶対的な数値としては注意して扱う必要がある。

GM 作物の非意図的な混入の程度は、GM 作物シェアの2つのシナリオ (10%と50%) の間で、大きな違いはないと推定される。実際的な結論としては、GM 作物の混入を防止する対策 (下記を参照) を、導入の早い時期に実施する必要があるだろう。

一方、この研究において設定した現在の農業活動を想定すると、推定される非 GM 作物中への GM 作物の非意図的な混入の程度は、作物と農家のタイプによって大きく異なる (たとえば、従来の集約的なトウモロコシ農家では2.2%程度、あるいはジャガイモの有機栽培農家では0.1%程度)。有機栽培農家では、すでに分離システムが実施されているため、GM 作物の非意図的な混入の程度は低く予測されることが多いが、注意すべき例外もある。たとえば、ナタネの種子生産を行う有機栽培農家では、自生植物 (volunteer)*の除去が難しいため、GM 作物が混入する確率が高いと思われる。

GM 作物の非意図的な混入の原因はよく知られており、種子への混入物、他家受粉、自生植物、および収穫・貯蔵作業の4つの主要な混入源に分けられる。最終的な混入レベルに対する各混入源の相対的な重要度は、作物と農家のタイプによって異なる。ナタネ種子生産農家、とくに有機栽培農家では、自生植物が GM 作物混入の主要な原因であるが、トウモロコシ栽培農家では自生植物の重要性は低く、GM トウモロコシの混入のほとんどは種子への混入と他家受粉が原因となっている。

* (訳注) 収穫時にこぼれ落ちた作物種子などから発芽した植物個体をさす。

有機栽培作物あるいは一般栽培作物への GM 作物の非意図的な混入を、農業活動の変更によって、政策上適切なある基準値以下に低下させることができるか？

その答は、やはり、農家と作物の組合せによって異なる。解析に使用した基準値は、さまざまな規則で論議されている基準と同程度である。他殖性植物 (ナタネ) の種子生産については0.3%、トウモロコシおよびジャガイモ (食品・飼料用) については1%である。ナタネ種子あるいは一般栽培のトウモロコシを生産しているすべてのタイプの農家は、この研究で設定した現在の農業活動のセットを変更することによって、これらの基準値を満たすことができるだろう。ここで言う現在の農業活動は、この点についての欧州農業の多様性を考えると、一つの妥協案であることに注意すべき

である。したがって、変更案のいくつか(および関連する諸費用の推定)は、多くの農家ですでに利用されているかもしれない。農家のタイプによっては、個々の農家のレベルで農業活動を変更するだけでは不十分なこともある。その場合には、変更には近隣の農家との協力が必要である。例としては、GM 品種と非 GM 品種の開花期をずらすことや、地区全体で境界管理を実施することなどがあげられる。一方、すべてのジャガイモ農家のタイプとトウモロコシ有機栽培農家では、この研究で設定した現在の農業活動のままで、これらの基準値を満たすことができるだろう。ここでは、すでにふれた絶対的な数値については保留する。

有機栽培作物や一般栽培作物への GM 作物の非意図的な混入を避けることは可能か？

各作物において、定量分析限界(0.1%以下)に近い、ごく低い基準値を満たすための活動の変更の可能性についても、この報告で検討している。これは、有機農業では GM 品種の利用が許可されていない状況(理事会規則(EC)1804/1999)を反映して、事実上の限界値を設けたものである。0.1%という基準は、地区の中に10%および50%の GMO が存在する検討シナリオでは、農業活動を大きく変更したとしても、農家と作物のどの組合せでも達成はきわめて困難であるとこの報告は結論している。ナタネ種子生産農家のいくつかのタイプでは、農業活動を大幅に変更した場合に限って、この限界値に近づけるかもしれない。

これらの変更の費用はどのくらいか？

費用の解析では、GM 作物農家と協力する場合には GMO 生産の側に本来影響する部分も含めて、すべての費用を一般栽培作物または有機栽培作物の生産に割り当てた。農業活動の変更とモニタリングシステムの導入によって1%および0.3%の基準値を満たし、さらに想定される保険をかけることは、50%シェアのシナリオにおいて検討された農家と作物の組合せでは、現在の生産物価格の1~10%の追加費用となる。ナタネの種子生産は例外で、農家タイプによっては費用はもっと高くなるかもしれない(最高41%)。どの場合も追加費用の大部分をモニタリングの作業が占める。GM 作物との分離が農業活動の中に完全に組み込まれ、GMO の検査費用が減少すると、費用は低下するだろう。一般的に、有機栽培農家での面積あたりの費用と生産量あたりの諸費用、とくに指標的な保険費用は、一般栽培農家より高い。けれども、生産物価格と費用の関係を見ると、有機作物の値段が高いことによって、この差はかなり小さくなるかもしれない。費用の計算では、農業中の GM 作物の割合が増加するとともに需要や市場価格が変化することは、まったく考慮していない。

異なった生産タイプを同じ地区内で共存させることは可能か？

この問題は、それぞれの作物について個別に検討する必要がある。けれども、地区内の基準値が0.1%のときは、どの検討シナリオにおいても共存は実質的に不可能である。0.3%(種子生産)と1%(食品・飼料生産)の基準値の場合、GMO のシェアが10%または50%の地区で GM 作物と非 GM 作物が共存することは、技術的には可能であっても、変更にもなう諸費用と複雑さのため経済的には困難な場合がある。ナタネの種子生産はその典型的な例である。ジャガイモでは追加の費用はかなり小さく、また大きく活動を変更する必要がないため、共存は現実的と思われる。トウモロコシ生産者の追加費用と変更の程度は中間的であるが、一般栽培を行う集約的トウモロコシ農家のいくつかのタイプは共存が難しいだろう。

異なった生産タイプを同じ農家で共存させることは可能か？

最後に、GM 作物と一般栽培作物または有機栽培作物とを同一の農家で栽培することは、農家の耕地面積が広くても現実的なシナリオではない。ナタネ種子生産者は、自生植物の影響が大きいため、非 GM 種子中への GM 種子の混入を避けるために同じ農地では GM ナタネの栽培を行わないだろう。トウモロコシとジャガイモでも、同一の農家での栽培は作物の取扱いをかなり難しくするだろう。

目 次

はじめに	i	3.1.14 ナタネについての総合的な結論	37
結論	ii	3.2 飼料用トウモロコシ子実の生産	40
要約	1	3.2.1 作物の生産と利用	40
1 序論	10	3.2.2 混入の経路	40
2 現在の分離システム	13	3.2.3 代表的な農家タイプ	41
2.1 認証種子の生産	13	3.2.4 コンピュータ・モデル MAPOD	41
2.2 組換え農作物供給チェーン・イニシアティ ブ	13	3.2.5 シミュレーションに用いる仮定	43
2.3 分離規約の実例	13	3.2.6 評価した混入抑制対策	43
2.3.1 英国小売り組合 / 食品・飲料連盟の規 約	13	3.2.7 農家 1 : フランスにおける集約的なト ウモロコシ子実生産	45
2.3.2 SojadePays (フランス国産大豆認定制度)	14	3.2.8 農家 5 : イタリアにおける集約的なト ウモロコシ子実生産	46
2.3.3 高エルカ酸ナタネ (HEAR)	14	3.2.9 農家 2 と農家 2' : 南フランスにおけ る有機栽培によるトウモロコシ子実生 産	46
2.3.4 もちトウモロコシ	15	3.2.10 農家 3 : 一般栽培による非集約的なト ウモロコシ子実生産	48
2.4 有機農業	15	3.2.11 農家 4 と農家 4' : 中央フランスにお ける有機栽培によるトウモロコシ子実 生産	48
2.5 結論	16	3.2.12 地区内に10%の GMO があるときの混 入レベル	48
3 GM 作物の存在下での農業活動の変更の効果 ...	17	3.2.13 農業活動の変更のための諸費用	49
3.1 種子用ナタネの生産	17	3.2.14 トウモロコシについての総合的な結 論	50
3.1.1 作物の生産と利用	17	3.3 食用ジャガイモの生産	53
3.1.2 混入の経路	18	3.3.1 作物の生産と利用	53
3.1.3 代表的な農家タイプ	19	3.3.2 混入の経路	53
3.1.4 コンピュータ・モデル GENESYS	19	3.3.3 代表的な農家タイプ	54
3.1.5 シミュレーションに用いる仮定	21	3.3.4 混入レベルの推定	55
3.1.6 シミュレーション結果の一般的な説 明	21	3.3.5 評価した混入抑制対策	55
3.1.7 GENESYS によって評価した 圃場内混入の抑制対策	21	3.3.6 農家 1 : 一般栽培による調理・加工用 ジャガイモの生産	55
3.1.8 農家 1 : 一般栽培による認証種子の生 産	22	3.3.7 農家 2 : 有機栽培による調理・加工用 ジャガイモの生産	56
3.1.9 農家 2 : 有機栽培による認証種子の生 産	27	3.3.8 農家 3 : 一般栽培による調理用早生ジ ャガイモの生産	56
3.1.10 農家 2' : 小規模有機栽培による有機 認証種子の生産	29	3.3.9 農家 4 : 有機栽培による調理用早生ジ ャガイモの生産	56
3.1.11 農家 3 : 一般栽培による農家保存種子 の生産	31		
3.1.12 農家 4 : 有機栽培による農家保存種子 の生産	34		
3.1.13 農業活動の変更のための諸費用	35		

3.3.10	農業活動の変更のための諸費用	56	5.2.2	中期的および長期的な影響	82
3.3.11	ジャガイモについての総合的結論	56	5.3	混入に備えた保険	82
4	非 GM 農産物のモニタリング	58	5.3.1	指標的保険費用	82
4.1	GMO の検出と定量	58	5.3.2	保険と個別の契約 - 現在の状況	84
4.1.1	最先端の検出、定量技術	58	6	対象作物での合計費用の解析	85
4.1.2	統一的な手法の必要性	63	6.1	費用の分類	86
4.1.3	農家での分析に利用できる現在の技術 と推定費用	66	6.1.1	農業活動の変更の費用	86
4.1.4	結論	69	6.1.2	モニタリングの費用	86
4.2	モニタリングシステムの提案	69	6.1.3	指標的保険費用	87
4.2.1	HACCP 手法	70	6.2	対象農家タイプでの合計費用	87
4.2.2	システムの構成	70	6.2.1	種子用ナタネ生産の合計費用	87
4.2.3	異なるレベルのモニタリング要求のため の適合	72	6.2.2	トウモロコシ子実生産の合計費用	90
4.2.4	モニタリングシステムの合計費用 - 固 定費用	74	6.2.3	食用ジャガイモ生産の合計費用	91
4.2.5	ナタネについてのモニタリング費用	75	6.3	追加的な解析	93
4.2.6	トウモロコシについてのモニタリング 費用	75	6.3.1	農業システムの影響	93
4.2.7	ジャガイモについてのモニタリング費 用	77	6.3.2	農家の規模の影響	94
4.2.8	結論	78	6.3.3	モデル作物間の比較	96
5	混入時の経済損失	80	6.3.4	助成金の影響	97
5.1	一般栽培農家での GM 作物混入の影響	80	7	総合的な結論	98
5.1.1	短期的な影響	80	7.1	各作物についての結論	98
5.1.2	中期的および長期的な影響	81	7.1.1	種子用ナタネの生産	98
5.2	有機栽培農家での GM 作物混入の影響	81	7.1.2	飼料用トウモロコシ子実の生産	99
5.2.1	短期的な影響	81	7.1.3	食用ジャガイモの生産	99
			7.2	総合的結論	99
			付録 I	: ナタネ生産農家の経営状況	102
			付録 II	: トウモロコシ子実生産農家の経営状況	104
			付録 III	: ジャガイモ生産農家の経営状況	105

要 約

背景、目的および範囲

1. EUの農業の中で遺伝子組換え(GM)作物のシェアが増大すると、非GM種子や作物中へのGM品種の非意図的な混入が問題となるであろう。したがって、GM作物の混入を最小限に抑えるための、農家レベルでの適切な対策を明らかにする必要がある。
2. 3つのモデル作物に共通するこの研究の目的は、次のとおりである。
 - 農家レベルでの非GM作物中へのGM作物の非意図的な混入の原因を特定し、その程度を予測する。
 - 非GM作物中へのGM作物の非意図的な混入を、政策上適切な基準値以下に低下させることができるような農業活動の変更を明らかにして、評価する。
 - 関連する農業活動の変更費用、モニタリングシステムの費用、および非GM作物中へのGM作物の混入によって生じうる財政的損失に対する保険システムの費用を推定する。
3. この研究は3つの作物を対象として、EUにおける各作物の代表的生産地域のいくつかの農家タイプについて実施した。
 - 種子(認証種子および農家保存種子)生産用の冬ナタネ(フランス、ドイツ)
 - 飼料用のトウモロコシ(イタリア、フランス)
 - 調理・加工用のジャガイモ(英国、ドイツ)
4. 3つのモデル作物を、特定地域における異なる生産形態の平均的農家の状況を代表する、一般栽培農家と有機栽培農家の複数のタイプ(認証ナタネ種子と農家保存ナタネ種子、集約的トウモロコシ栽培と非集約的トウモロコシ栽培、早生ジャガイモと普通ジャガイモ)について調査した。比較を容易にするため、一般栽培農家と有機栽培農家については同程度の圃場面積と区画面積を想定した。さらに一部の加盟国の状況を反映するため、より小規模な有機栽培農家のタイプを調査した。

基本的な想定と考察

5. 農家での非GM作物中へのGM作物の非意図的な混入の程度を予測し、農業活動の変更の影響を比較

するため、専門家の科学的意見とコンピュータ・モデルの組合せを使用した。コンピュータ・モデルは、異なる農業活動の比較に有用である。各モデルはまだ現地データで十分に検証されていないため、各モデルが与える絶対的な数値の取扱い(たとえば、ある特定の基準値を満たせるかどうかの検討など)には注意しなければならない。

6. 非GM作物中へのGM作物の非意図的な混入の「ベースライン」水準を推定するため、一組の農業活動(この研究では「現在の農業活動」と呼ぶ)を作物ごとに定める必要がある。これらの「現在の農業活動」は、EUの農家に存在する農業活動の多様性を考えると、一つの妥協案であることは明らかである。したがって、解析の結果、ある基準値を満たすために必要な農業活動の変更が示される場合や、さらにこれらの変更費用を推定する場合、提案される活動または同様な農業活動が、とくに種子生産の場合は、かなりの数の農家ですでに適用されていることがある。
7. 非GM作物中へのGM作物の混入を抑制するために必要となる諸費用の推定額は、すべて非GM作物生産に割り当てることを基本にしている。これは、GM作物の混入抑制対策が、GM作物を商業生産する側に法的に義務づけられていない現状を反映している。
8. 費用の計算においては、GM作物の市場価格は対応する一般栽培作物よりやや低いと想定している。これ以外の、農業におけるGM作物の増加による市場価格や需要の変化などは考慮していない。したがって、この研究の結果は今後の市場価格の予測やGM作物と非GM作物の需要の予測には使用できない。

総合的な知見

9. 農家レベルでの非GM作物中へのGM作物の非意図的な混入の原因には、種子への混入、風、昆虫あるいは機械による畑から畑への花粉と種子の拡散、植物の越冬、拡散した種子からの植物の生長、さらに収穫後の作物の混入がある。
10. 地区内で栽培されているGM作物の割合は重要な要因であり、地区内に10%のGM品種があるだけでも、非GM作物の中のGMOの量はかなり高く

なる。地区内の GM 作物のシェアが10%および50%の2つのシナリオを分析した。50%のシェアは、GM作物をすぐに取り入れた国の現在の状況（たとえば2000年には、アメリカの大豆栽培面積の約54%は組換え大豆であり、カナダのナタネ栽培面積の50%がGMナタネであった）に即しており、この研究で検討する主要なシナリオである。一方、10%のGMOのシェアは、EUの農業へのGM作物導入の初期段階を表している。

11. 土壌の管理、播種日、輪作システム、農家の生産基盤などの農業活動の違いは、農家面積や圃場区画の大きさと同時に、非GM作物中へのGM作物の混入に影響するだろう。
12. この研究で用いた基準値のレベルは、1%（トウモロコシとジャガイモ）0.3%（ナタネ種子生産）および0.1%（3つのモデル作物すべて）である。最初の二つの基準値は（GM食品の表示についての）欧州法に含まれており、また将来の法令（種子流通に関する指令の改正）に関して議論されている基準値である。0.1%の基準値は、現在の分析手法の定量限界値に相当し、GMOがまったく含まれない状態を表している。これは、有機農業でのGM品種の使用が理事会規則（EC）1804/1999によって禁止されているため、定量限界が事実上の基準値となっていることに対応している。1%と0.3%の基準値は、この研究で定めた現在の農業活動を変更することによって、調査したどちらのシナリオにおいても達成できる。調査した事例のいくつかでは、近隣の農家との協力を含む農業活動がもっとも効果的である。
13. 非常に低い基準値（0.1%）を満たすことが可能かどうかを、3つのモデル作物すべてについて分析した。その結果、この基準値を守ることは、農業活動を大きく変更したとしても、検討した2つのシナリオのいずれでも難しいことが示された。したがって、現在、有機栽培に要求されている非常に低い基準値（検出限界）が適用されると、GM作物が栽培されている地区では有機栽培ができないことになる。
14. 1%の基準値を満たすためには、トウモロコシとジャガイモの現在の生産物価格の1%から9%に相当する新たな費用（農業活動の変更、モニタリングシステム、保険）が必要になるだろう。ナタネ種子の生産では、0.3%の基準値を守るための費用は現在の価格の10%から40%になるだろう。

個別の知見

種子生産用の冬ナタネ

15. 認証種子生産あるいは農家保存種子生産について、有機栽培農家と一般栽培農家の4つのタイプを調査した。認証種子生産者は、認証種子生産基準にしたがってナタネを栽培すると想定した（たとえば、ハイブリッド種子生産では300mの隔離距離と6年輪作、徹底した収穫後分別）。農家保存種子を使用している農家はこれより大規模（約3倍）で、圃場区画も大きいと想定した。一般栽培農家では、3年の短期輪作、近隣農家との種子交換と機械の共有、あるいは、収穫時等の請負業者の利用を行う。GM作物専用の機械類や貯蔵施設はない。農家の特性、予測される非GMナタネへのGMナタネの非意図的な混入の程度、農業活動の推奨される変更、および関連する費用についての要約を、本項の付録の表Aに示す。
16. 圃場内での非GM作物中へのGM作物の混入程度を推定するため、コンピュータ・モデルGENESYSを使用した。このモデルは、除草剤耐性ナタネから自生ナタネ類への、時間（種子を通して）と空間（花粉と種子を通して）の両方の遺伝子流動の可能性によって各栽培体系を評価する。これは作物生産ばかりでなく種子生産にも適用できる。収穫後のGMナタネの非意図的な混入程度の推定には専門家の意見を使用した。
17. この研究で定めた現在の活動を適用した場合、GM作物の非意図的な混入の程度は、50%のGMOの存在下で検討した農家タイプに対しては、0.42%から1.05%の範囲であると推定された（表Aを参照）。有機栽培農家では、一般栽培農家と比較して自生植物個体の除去効率が低いため、GMナタネの混入の程度が高いと予測される（表Aの「現在の活動」を参照）。農業活動を変更することによって、種子生産におけるGMO含有量として想定した0.3%の基準値が、一般栽培と有機栽培のすべての農家タイプで達成できるであろう。
18. 理論的には、農業活動を変更することによって、GM作物の混入を非常に低いレベル（0.1%未満）に抑えることが可能である。農家保存種子を使う一般栽培農家だけは例外で、収穫後の管理戦略を全面的に変更しなければ、このような非常に低いレベルを達成することは不可能と思われる（表A、「最良の活動への変更」を参照）。

19. GM作物の混入の程度は、畑の面積(追加的な小規模農家のシナリオの調査で示される)、隔離距離、自生植物個体の抑制と、収穫後の種子作物の取扱いにかかわる農家の施設(分別が可能かどうか)によって異なる。さらに、ナタネでは、最初の種子純度と選択した品種の特性(雄性稔性の低い品種群およびハイブリッド品種、あるいは、種子生産では、雄性不稔親系統は、きわめて他家受粉しやすい)が、重要な要因となる。

20. このモデルによって、次のことが効果的な対策として予測された。

- 種子生産圃場の周辺300m以内では、輪作のどの時期においてもナタネの栽培を避ける(作物と輪作の長期の変更が必要なため、費用の推定は難しい)。
- 自生ナタネ類の残存を最小限にするため、春に被覆植物を播種することによって休閑圃場管理を変更する(追加費用を194ユーロ/haと推定)。
- 自生植物個体を抑制するため、新たにナタネ以外の春作物を加えて輪作を長期化する(新たな費用はないと想定)。

どの対策を選択するかは農家のタイプによって異なるが、一般に、休閑圃場の管理を変更することと、区画の周辺300mにナタネ無栽培地帯を設定することは、もっとも効果的な活動である。ただし、これらはかなりの費用がかかったり、他の農家との協力が必要であったりする。これに類した対策は、種子会社との契約義務によって一部の農家ですでに採用されているかもしれない。欧州委員会植物科学委員会(SCP)は、2001年3月13日の意見書で、他家受粉を避けるためには種子生産の年にハイブリッド種子から600m以上の隔離距離をとることを勧めている。

子実生産のためのトウモロコシ

21. トウモロコシ子実生産については、7つの農家タイプを調査した(一般栽培農家と有機栽培農家、集約栽培と非集約栽培、大規模有機農家と小規模有機農家)。トウモロコシ集約栽培の大きな特徴は、その栽培面積の割合が高く(農地面積の50~80%)、各区画間の隔離距離がさまざまだが、一般的に狭いことである。一方、非集約栽培地区(トウモロコシが農地面積の20%を占める)でのトウモロコシ栽培農

家は、区画が大きく、隔離距離はおよそ500mと想定する。農家の特性、非GM作物へのGM作物の非意図的な混入の程度、農業活動の推奨される変更、および関連する費用についての要約を、本項の付録の表Bに示す。

22. コンピュータ・モデルMAPODを用いて、他家受粉を通じた圃場内での非GMトウモロコシへのGMトウモロコシの混入の程度に対する、農業活動の変更の効果を推定した。収穫後の混入の程度は、専門家委員会によって推定した。

23. 現在の農業活動を適用した場合、非GM作物の中にGM作物が非意図的に混入する程度は、50%シナリオで検討した各農家タイプにおいて0.16%から2.25%の範囲と推定される(表Bを参照)。

24. GM植物からの他家受粉は、圃場内でのGMトウモロコシの混入のおもな原因である。影響の程度は、隔離距離だけでなく、花粉源となるGM圃場と受粉側の非GM圃場の相対的な面積の大きさによっても異なり、小規模農家や小さな圃場をもつ農家は影響を受けやすい。トウモロコシの場合、自生植物個体は、GM作物の混入の重要な原因ではない。

25. 播種用に使われる認証種子の中への混入物も、GM作物の混入の重要な原因となるだろう。経済協力開発機構(OECD)の制度では、一般栽培トウモロコシの認証種子のための品種の純度は99.0%が要求される。この研究では、一般栽培トウモロコシの種子中のGM種子の混入を、0~0.3%と想定した。有機栽培種子については、種子混入の基準はより低くなると予想されるため、この研究では0.05%という水準を想定した。

26. 一般栽培農家では、トウモロコシの選別、乾燥、貯蔵を中心施設で行うことが多いので、そこで非意図的な混合が生じうる。このため、トウモロコシ子実の収穫後処理がGM作物の混入のもう一つの主要な原因となっている。

27. トウモロコシを集約的に一般栽培する生産者が1%の基準値を満たすためには、農業活動を変更する必要がある(10%と50%の両方のシナリオで、使用した種子の中に約0.3%のGM種子が混入しているとすると)。種子への混入を減少させることは大きな効果があると思われるが、実現することは困難かもしれない(2001年3月13日のSCPの意見)。隔離距離を100mから200mまで拡大すること、開花時期の異なるGMと非GMのトウモロコシ品種の導入、

および収穫後管理の改善（非 GM トウモロコシ専用の貯蔵、選別、乾燥の施設）は可能な代替案である。隔離距離の拡大と収穫後管理の変更については、非常に複雑な性質を持つため、費用を計算していない。開花時期の違いを効果的にするためには、GM 品種の開花時期が非 GM 品種より早いことが必要である。一般に早生品種の収量は低いため、約45ユーロ/haの追加費用が（GM トウモロコシ生産者の側に）必要となるだろう（表 B の「最良の活動変更」および「追加費用」を参照）。

28. あまり集約的ではないトウモロコシ栽培地区では、一般栽培農家が1%の限界値を達成するためには、収穫後の管理を変更するだけで十分かもしれない（非 GM トウモロコシ種子中への GM 種子の混入は0.3%と想定した）（表 B の「最良の活動変更」を参照）。
29. 有機栽培農家（GM トウモロコシは無栽培）は、純度の高い有機栽培種子を使い、一般生産とは分離して収穫後管理を行っているため、現在の農業活動を変更せずに1%の基準値を満たすことができるだろう。
30. 0.1%の基準値は、どの農家シナリオにおいても達成がきわめて困難と考えられる。

調理・加工用のジャガイモ

31. ジャガイモは、収穫されるいもが受精によって生じたものではないため、ナタネやトウモロコシとはかなり異なる性質を持っている。GM 作物の混入の原因として、花粉流動についての問題はかなり少ない。調査した4つの農家タイプ（早生ジャガイモの一般栽培生産と有機栽培生産、調理および加工用のジャガイモの一般栽培生産と有機栽培生産）での主要な問題は、自生ジャガイモ（groundkeeper）と収穫後の生産物管理である。
32. ジャガイモについては、専門家の意見のみを用いて、圃場内と収穫後における GM 作物の混入の程度を推定した。現在の農業活動を、品種の徹底分離とともに適用すると、非 GM 作物への GM 作物の非意図的な混入程度は、0.1%から0.54%の範囲と推定される（本項の付録の表 C を参照）。
33. 検討した4つの農家タイプは、農業活動を変更せずに1%の基準値を満たせるであろう。有機栽培農家での GM 作物の非意図的な混入の程度は、一般栽培農家の半分以下である。しかし、農業活動を変更

したとしても、0.1%の基準値はどの農家タイプでも達成できないであろう。ジャガイモ栽培農家の特性と結果を表 C に示す。

既存の分離システムの適用可能性

34. もちトウモロコシ（waxy maize）や高エルカ酸ナタネなどで、すでに実施されている分離システムを、非 GM 作物中への GM 作物の非意図的な混入を抑制するために利用するには、重要な変更をいくつも追加しなければならない。一般に、これらのシステムが保証している基準値は、GM 作物について決めようとしている値よりゆるやかである。また、これらの分離システムのいくつかは、安価で、速く、簡易な検出方法（もちトウモロコシに対するヨウ素染色など）を背景にしているが、GM 品種を検出して識別する現在の方法で、このような特長を持つものはまだない。

農家における非 GM 作物への GM 作物の混入のモニタリング

35. モニタリングシステムの開発は、生産作業の中で制御すべき重要な段階を決定する危害分析重要管理点（HACCP）法を適用して行うことができる。モニタリングの対象とする生産段階を変えることによって、非意図的な GMO 混入の基準値と混入の確率とに応じた、強度の異なる管理を実施できる。栽培作業の時期ごとに、分離を確保する手順を文書化しなければならない。この仕組みを実施するには、検出手法（定性的および定量的な GMO のポリメラーゼ連鎖反応（PCR）分析）が必要である。
36. GMO の含有の検出と定量は、通常、PCR による組換え DNA の分析または免疫測定法（酵素結合免疫吸着検定（ELISA）法）による含有タンパク質の分析によって実施される。これらの検査は、かなり時間がかかり、実験設備と、もちろん熟練した人員が必要である。農家段階での GMO 含有の管理を可能にするためには、PCR と ELISA に基づく、正確で、安価で、速く、そして簡易な検査方法の開発が必要である。現在の検査価格は、定量 PCR 解析が1サンプルあたり約320ユーロ、ELISA による半定量分析が1サンプルあたり約150ユーロである。検査されるサンプルの数が多くなれば価格は低下するだろう。
37. いくつかの国の組織と国際組織が、試料採取手順と

GMO 検出法についての共通の指針と基準の作成に関わっている。検査の手法、とくに PCR の検証が、複数の検査機関によるリング・トライアル(比較試験)の実施によって行われている。この分野における EU の主要な取組みとして、GMO 検査機関の欧州ネットワークがあり、共同研究センター/保健・消費者保護研究所(JRC/IHCP)によって組織されている。特定の GMO についての PCR 検査と ELIZA 検査のための認証標準試料が共同研究センター/標準試料・測定研究所(JRC/IRMM)によって開発されている。

保険システム

38. 非 GM 作物中への GM 作物の混入が定められた基準値を上まわった場合は、収入の減少が予想される。有機栽培農家では、予定していた有機作物の価格割増し分と助成金を失うことになるため、短期損失はさらに高くなるだろう。指標的保険費用を、短期損失と、3%の許容値を上まわる想定頻度とを用いて算出した。中・長期的には、自生 GM 作物を抑制するための作物管理、GMO 検査、あるいは GMO 抑制のための追加的な費用がこれに加わる。有機栽培農家では有機認証を再取得するために時間がかかるため、さらに収入の損失があるだろう。

費用の影響

39. 50%のシナリオにおいては、ナタネ種子で0.3%、トウモロコシとジャガイモで1%の基準値を満たすために、以下に示す費用が必要である。
40. 農業活動の変更が必要になったときの農家の経済的負担は、作物と農家のシナリオによって大きく異なる。モニタリングシステムの費用はすべての農家に大きな影響がある。モニタリング費用の大きな部分は農家単位で固定されているため、その総額は農家の規模と負の相関がある。指標的保険費用は、有機栽培農家の多くでは、価格割増しがあるために影響が大きい。一般栽培農家での影響はほとんどない。面積あたりの費用はそれほど変わらないが、作物間の収量と価格の違いによって経済的影響は著しく異なる。このことは、生産物価格に対する費用総額を示した付録の図 A に示されている。
41. ナタネについては、認証種子生産を行っている一般栽培農家では、追加費用は価格の10%で、費用の大部分はモニタリング費用である。これに対応する有

機栽培農家では、費用は価格の20%以上となるが、この差は農業活動の変更費用が大きいことによる。保存種子を使用する農家では、追加費用は価格の17%(一般栽培農家)あるいは41%(有機栽培農家)となり、有機栽培農家はさらに費用のかかる新たな農業活動を適用しなければならない。これらの農家は種子の保存をやめて、かわりに認証種子を購入せざるをえないだろう。

42. トウモロコシについては、集約的な一般栽培農家での追加費用は価格の9%に相当する。費用の半分近くは開花時期の変更による収量低下によるものである。ただし、一般栽培農家での収穫後管理の変更に必要な費用はこの研究では推定していない。同じ地区の有機栽培農家での費用は価格の6%であり、おもにモニタリング費用と指標的な保険費用である。非集約的なトウモロコシ生産(有機栽培農家と一般栽培農家)における費用は価格の4~5%であろう。有機栽培農家では指標的な保険費用がかなり高いが、生産物価格が高いために費用総額の経済的影響は小さい。
43. ジャガイモは、さらに影響を受けにくいモデル作物である。どの農家も農業活動を変更する必要がなく、またナタネやトウモロコシよりも収量が高いため、トンあたりの費用はずっと小さい。モニタリングと指標的保険の費用は農家売渡し価格の1~3%程度に相当するだろう。
44. 一般に有機栽培農家の追加費用は、面積あたりでも収量あたりでも、一般栽培農家より高い。これは、モニタリング費用や指標的保険費用がやや高いことと、ある場合には、農業活動の変更の費用が高いことによる。けれども追加費用を生産物価格と比較する場合には、有機作物への価格割増しによってこの差はかなり小さくなる。

今後の研究の必要性

45. 推奨された農業活動のいくつかを、GM 作物を栽培する農家を使うこともありうる。これらの農家が、非 GM 作物中への GM 作物の混入の可能性を小さくするためにとくに使える活動について、その効果を確認し、評価するための研究が、今後は必要である。導入遺伝子の拡散を防ぐための GM 作物の特別な生物学的特性の研究もその中に含まれる。
46. EU 内で流通している種子への実際の混入の程度についての情報(一部の加盟国検査機関から入手可能

になってきた)が、ここで示したシミュレーションのためにさらに必要である。また、共存が種子生産にどのような影響を与えるのかをさらに解明し、種子生産基準を適用するために必要な情報を提供するため、ここではナタネ種子について述べたと同様の研究をトウモロコシ種子についても行うことが有益と思われる。

47. 非 GM 作物中への GM 作物の微量の混入の有無を検査機関で徹底的に調査することは、GM 作物が普及した国では有効ではない。
48. 共存による経済的影響をもっと広範囲に分析するためには、特定の農家の経済環境全体について、さらに深く解析する必要があると思われる。

表 A 現在の農業活動と推奨される農業活動による一般栽培農家と有機栽培農家での非 GM ナタネ種子生産への GM ナタネの混入（地区の GMO 栽培が50%、中期的評価）*

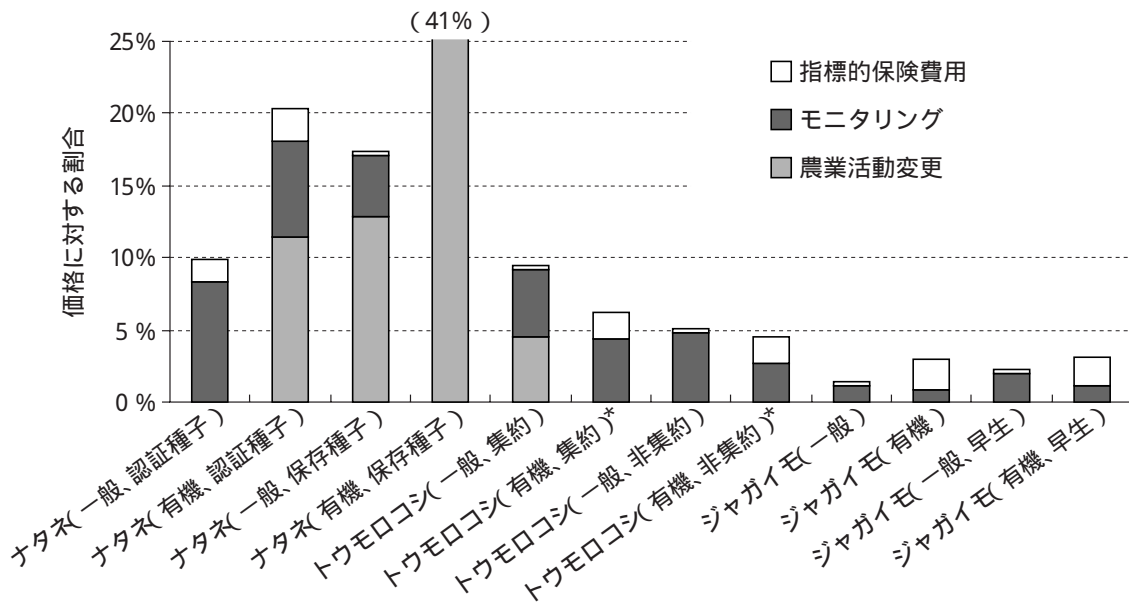
農家のタイプ	認証ハイブリッド種子生産		農家保存種子生産	
	一般栽培農家	有機栽培農家	一般栽培農家 （農家内で 50%の GM 作物を栽培）	有機栽培農家
農家の特性				
農家面積	131 ha	131 ha	351 ha	351 ha
区画サイズ	6 ha	6 ha	11 ha	11 ha
区画（種子）の数	1 - 2	1 - 2	6 - 7	6 - 7
現在の活動 予想される混入の割合	0.42%	0.61%	0.59%	1.09%
0.3%の基準値を満たす 最良の活動への変更 予想される混入の割合	輪作中に春作物 を追加導入 0.19%	休閑地に被覆植 物を春季播種 0.04%	機械専用化、 機械の清掃 0.23%	休閑地に被覆植 物を春季播種 0.11%
追加費用（EUR/ha）	~ 0 **	194.3	93.2	194.3
0.1%の基準値を満たす 最良の活動への変更 予想される混入の割合	休閑地に被覆植 物を春季播種 0.03%	休閑地に被覆植 物を春季播種 0.04%	達成不可能	活動の組合せ*** 0.07%
追加費用（EUR/ha）	194.3	194.3	-	198.6
<p>* 種子バンクには、シミュレーションの開始時に混入がないと仮定した</p> <p>** 現在の活動から追加する費用はない</p> <p>*** 活動の組合せには、休閑地への被覆植物の春季播種、ナタネ以外の作物を栽培する前の耕運、地区全体での境界管理、播種時期をずらすことなどが含まれる</p>				

表B 現在の農業活動と推奨される農業活動による一般栽培農家と有機栽培農家での非GMトウモロコシ実生産へのGMトウモロコシの混入(地区のGMO栽培が50%)

農家のタイプ	集約的トウモロコシ耕作地区				非集約的トウモロコシ耕作地区		
	一般栽培農家 フランス (農家内外のGM作物50%)	有機栽培農家 (大)	有機栽培農家 (小)	一般栽培農家 イタリア (農家内外のGM作物50%)	一般栽培農家 (農家内外のGM作物50%)	有機栽培農家 (大)	有機栽培農家 (小)
農家の特性 農家面積 区画サイズ 区画数	60ha 3-4ha 14	60ha 3-4ha 14	10ha 1ha 1	50ha 8ha 3	100ha 20ha 1	100ha 20ha 1	15ha 3ha 1
現在の活動 予想される混入の割合	2.25% (±0.6%)	0.16% (±0.07%)	0.58% (±0.04%)	1.75% (±0.2%)	0.8% (±0.5%)	0.17% (±0.09%)	0.32% (±0.04%)
1%の基準値を 満たす最良の活動への変 更 予想される混入の割合	開花時期を 50度日ずらす+ 収穫後管理 0.66% (±0.3%)*	現在の活動	現在の活動	最小距離 200m + 収穫後管理 0.69% (±0.3%)*	収穫後管理 0.51% (±0.3%)*	現在の活動	現在の活動
追加費用 (EUR/ha)	45.4+n.d.	0	0	n.d.	n.d.	0	0
基準値0.1%	達成できない						
<p>* 混入種子の割合は0~0.3%と想定。同型接合のGMトウモロコシ品種では、生産された作物の中の混入種子の影響は2倍である。したがって、混入種子の影響は0~0.6%の範囲とし、ここでは0.3±0.3%と表現する。</p> <p>n.d.: 算出していない</p>							

表C 現在の農業活動と推奨される農業活動による一般栽培農家と有機栽培農家での非 GM ジャガイモ生産への GM ジャガイモの混入(地区の GMO 栽培が25~50%)

農家のタイプ	調理・加工用のジャガイモ		早生ジャガイモ	
	一般栽培農家 (農家内で 25~50%の GMOを栽培)	有機栽培農家	一般栽培農家 (農家内で 25~50%の GMOを栽培)	有機栽培農家
農家の特性 農家面積 区画サイズ 区画数	150ha 10ha 3	150ha 5ha 5	75ha 3ha 5	75ha 3ha 5
現在の活動 予想される混入の割合	0.36% (±0.15%)	0.1% (±0.02%)	0.54% (±0.21%)	0.16% (±0.05%)
1%の基準値を満たす 最良活動への変更	現在の活動	現在の活動	現在の活動	現在の活動
追加費用 (EUR/ha)	0	0	0	0
基準値0.1%	達成できない			



図A 非 GM 作物中の GM 作物混入基準値を達成するための合計費用の農家売渡し価格に対する割合(目標基準値は、ナタネでは0.3%、トウモロコシとジャガイモでは1%)

*一般栽培トウモロコシについては、収穫後管理の変更の費用を含まない。

1 序論

遺伝子組換え(GM)作物は、1996年に世界中のかなりの地域で商業栽培が開始された。その栽培面積は1996年の260万haから2000年の4210万haまで急速に拡大し、2001年の終わりには5000万haに達したと思われる¹⁾。米国、カナダ、アルゼンチンと中国が、GM作物の栽培面積の99%を占めている。栽培されているおもなGM作物は、大豆、トウモロコシ、ワタ、ナタネである。EUでは、1999年と2000年に、ポルトガル、フランス、スペインでBtトウモロコシの栽培面積が減少している²⁾。この減少は、おもに、環境と人間の健康に有害な影響があるかもしれないという不安を反映して、GM作物とGM食品に対する社会の懸念が広まったことによる。

1999年6月に、欧州環境関係大臣理事会において、遺伝子組み換え生物(GMO)の市場流通の認可を、GMOの実験的な放出と市場流通を規制する指令90/220/EECが改定されるまで事実上停止することが承認された。2001年2月に、改定された指令(指令2001/18/EC)が欧州議会と閣僚理事会によって承認され、2002年10月には発効する。さらに、2001年7月には、GM食品と飼料に関する規則およびGMOの追跡可能性(traceability)と表示(labeling)に関する2つの提案が、欧州委員会によって採択された。また、GM種子に関する追加提案が、2001年末に予定されている。新たな指令と規則は、法的な枠組みのすき間をなくし、GM製品の安全性に関する消費者の不安に答えるものである。

新しい法的な情勢によって、いずれ、新たなGM作物の市場流通が認められることになるだろう(2001年11月の時点では14のGM植物の承認が未決定になっている)。新たなGM品種が、約5年のうちに欧州市場に現れるかもしれない。

GM作物が一般栽培作物あるいは有機栽培作物の中に混入する可能性が、新たな関心事となっている。有機農業は、1999年にはEUの農業面積の2.6%を占め、フランスで1.3%、英国で2.4%、ドイツで2.6%、デンマー

クで5.5%、イタリアで6.5%、オーストリアで8.5%であった³⁾。有機農業は近年世界中で急速に盛んになっており、農地面積と農家数に占める割合はともに増加し続けている。有機農業の基準は厳しく、生産のあらゆる段階を対象としている。GMOの利用や混入は有機農業では認められない。

EUは、一般栽培の食品や食品成分への流通段階でのGMOの非意図的な混入⁴⁾について、1%の表示基準値を導入した。各成分について1%以上のGMOを含む食品には、規則(EC)49/2000に従って、すべて表示をつけなければならない。2001年7月のGM食品と飼料に関する規則の新たな提案では、導入DNAあるいは導入タンパク質の検出の有無にかかわらず、GMOから作られたすべての食品(および飼料)に、現在の表示規定が拡大される。これは、たとえば、DNAが検出されないGMナタネの精製油にもGM食品の表示をしなければならなくなることを意味する。1%の基準値は、すでにEUの機関による科学的なリスク評価を受け、人の健康や環境にリスクを及ぼさないことが明らかになっている未承認GMOの、微量の混入についても提案されている。この基準を満たさない生産物は、EU内では販売できなくなるだろう。非GM作物の生産者(一般栽培農家)は、これらの基準値を守らなければならず(法的規制)、また、もっと厳しい生産ライン(自発的規制)では、さらに低い基準値が適用されるだろう。

欧州農業にGM作物が大規模に導入される可能性は、一般栽培作物および有機栽培作物との共存の問題を生みだすだろう。農業総局は、2000年5月に、遺伝子組換え作物と一般栽培作物、有機栽培作物との共存に関する農学と経済学の側面の研究を共同研究センター(JRC)に要請した。この研究は、予測技術研究所(IPTS/JRC)によって、2000年9月に開始された。この総合報告書は、2000年10月から2001年7月までの期間に得られた結果の要約である。

1) 欧州委員会、農業総局 2000年。農業 食品分野における遺伝子組換え作物の経済的影響(Economic impacts of genetically modified crops in the agri-food sector); ISAAA(国際農業バイオ技術事業団)2001年10月18日 プレスリリース。
 2) Clive James、2000年 ISAAA 短報 No21
 3) 欧州委員会、農業総局 2001年。EU 有機農業便覧。
 4) 「混入(contamination)」という語は、一般栽培作物あるいは有機栽培作物に、ある基準値以上のGM作物が混じることによって、特定の市場や利用には適さなくなることを表すために使用する。一般栽培作物あるいは有機栽培作物の中に遺伝子組換え生物(GMO)が含まれることで、それらが有害なものになるという意味ではない。

この研究の目的は、次のとおりである。

- 農家レベルで一般栽培作物と有機栽培作物に GM 作物が混入するかもしれない原因と確率を明らかにし、分析すること。
- 遺伝子流動と、GM 作物と非 GM 作物との混合を最小限に抑えるために必要な農業活動の変更を明らかにし、提案すること。
- 農業活動の変更案にともなうさまざまな費用を推定、分析すること。
- 非 GM 作物を基本とする農業で生産された農産物が、ある基準レベル以上の GMO を含んでいないことを確認するためのモニタリングシステムを開発すること。
- 非意図的な混入の影響を確認し、それによる一般栽培農家と有機栽培農家での経済的損失を推定すること。

この研究は、作物の生産サイクルおよび最初の流通ポイントまでの収穫後作業を含めた、種子、飼料、食品の生産を対象にする。食品と飼料の加工と小売り、および遺伝子流動の環境的側面は研究の領域から除外する。

異なる目的で栽培される 3 つの農作物、種子生産のための冬ナタネ、飼料生産のためのトウモロコシ子実、食用生産（加工食品と調理用）のためのジャガイモを、事例研究の対象とした。これらの作物は、異なる生物学的特性を代表し、3 つの作物すべてが、GMO の栽培と一般栽培、さらに有機栽培と関連がある。しかも、どの作物についても GM 品種が開発されており、EU レベルですでに認可されているかあるいは保留されていて、科学文献が入手できる品種が含まれている。最後に、3 つの作物はどれも欧州において経済的に重要な作物である。これらの作物が EU 内の主要な生産地域で、すなわち、冬ナタネがフランスとドイツで、トウモロコシ子実がフランスとイタリアで、ジャガイモが英国とドイツで、それぞれ研究された。

この研究では、各作物について 2 つの異なった混入基準値を考慮する。

- ・ 種子生産用冬ナタネについて、0.1%と0.3%
- ・ 飼料用のトウモロコシ子実について、0.1%と1%
- ・ 食用のジャガイモについて、0.1%と1%

一般品種の栽培面積に対する GM 品種の栽培面積の割合は、農業活動の変更の必要性に影響する。そのため、この研究では、GM 品種の栽培面積について 2 つの予想されるシナリオ、すなわち10%と50%のシナリオを分析

する。50%のシェアは、GM 作物を実際に栽培している国の状態（たとえば2000年には、米国の大豆栽培面積の約54%が GM 大豆、カナダのナタネ種子栽培面積の約50%が GM ナタネ種子だった）を想定しており、この研究で検討される主要なシナリオである。地区内での10%の GMO シェアは、EU の農業における GM 作物のゆっくりした導入を想定したシナリオである。

3 つの作物のすべてについて、いくつかの一般栽培農家と有機栽培農家のタイプを研究した。各農家タイプは選定した各地域の平均的な農家を代表するように、研究の最初に決めた特定の基準をもとにして設定した。この研究では「現在の農業活動」と呼ばれる一揃いの農業活動を各作物について決め、非 GM 作物中への GM 作物の非意図的な混入の「ベースライン」水準を推定した。EU の農家に存在する農業活動の多様性を考えると、これらの現在の農業活動が一つの折衷案にすぎないことは明らかであろう。

最後に、この研究では複数の農業システムが農家レベルで共存するときの諸費用を解析している。一般栽培農家と有機栽培農家を中心に扱い、算出された諸費用は、GMO を使用する農家の農業活動の変更費用も含めて、すべて非 GM 農家が負担するとした。この考え方は、GM 作物農家には近隣の非 GM 作物への混入の可能性を最小限に抑える法的義務はないという、現在の状況に対応するものである。混入を抑制するための新たな対策の実施費用、農業の各作業と生産物中の GMO 成分のモニタリング費用、および混入によって予想される経済的損失を対象とする。

この文書は予測的研究であり、さまざまなシナリオについて必要とされる前提に基づいている。したがって、これらの想定を今後の進展の予想とみなすことはできない。このことは、10%および50%とした GMO のシェアと0.1%、0.3%、1%とした基準値とくにいえる。GMO のシェアが増大するときには、対応する需要が必ずあるはずであり、価格構造も変化するであろう。これらの側面はこの研究では扱われていない。ここで示すシナリオは現状に基づくもので、算出した費用は今後の価格を予測するためには使えない。

この序論に続いて、第 2 章では、現在の分離システムと、これを GM 作物と非 GM 作物の分離に利用する可能性について概略を示す。第 3 章では選択したシナリオにおける混入の確率を解析し、農業活動の変更の効果を推定する。第 4 章では GMO の検出と定量の技術につい

て説明し、さらに農家内のモニタリングシステムについて提案する。次の第5章では、混入が発生した場合に一般栽培農家と有機栽培農家で予想される影響を解析する。第6章では算出された諸費用を集計し、GM作物と

非GM作物の共存と分離に係るであろう追加費用の総額について議論する。第7章では最終的な結論を述べる。そして選定した農家タイプの経営状況に関するデータを付録に示す。

2 現在の分離システム

農業では、特定の作物を分離することは、よく知られた問題である。いくつもの分離システムがあるが、GM作物を扱っているものはほとんどない。この章では、既存の分離システムあるいは新たな分離システムの提案と、それらが非GM作物からGM作物を分離するために利用できるかどうかについて、概略を述べる。

2.1 認証種子の生産

遺伝的汚染を最小化して品種の純度を最大化するための法的な対策が存在しているのは、販売を目的として栽培される種子についての規制のみである。市販種子の純度を十分なものに保つための法令は世界中に存在する。しかし、その規制は、種子業者を通して販売される種子についてのもので、個々の農家が保存する(後でほかの農家に渡すかもしれない)種子は規制されていないことに注意する必要がある。

EUの種子流通指令では、採種用の作物と、その区画内で栽培される同じ種のほかの作物すべてとの間の分離距離が、時間間隔とともに指定されている。各国の種子検査と検査機関がこの規制を支えている。最低限の純度レベルが達成されなければならないが、種子会社は、さらに厳しい規則を採用することが多い。純度の基準を達成できない場合は、無保証の種子となり、栽培者は認証種子への割増金を失うことになるだろう。品種の純度基準を守ることは、96%以上の場合に、採用した手順(隔離、清掃、輪作、および収穫後処理の分離)が、種子供給に必須の厳しい純度基準を十分に満たしていることを意味している。

けれども、認証種子に適用される純度基準は、この研究でGMOの含有について使用される0.3%と0.1%の混入率の基準を満たすには必ずしも十分ではない。たとえばハイブリッドナタネの認証種子の最低純度は90%にすぎない。したがって、隔離距離をもっと長くする、清掃をもっと行う、あるいは非GM種子を生産する場所では以前にGM品種が栽培されていないことを条件とするなど、追加の予防手段が必要であろう。さらに、種子

の生産は割増し価格に頼る小規模な事業であるため、商品作物の大量生産とは比較できない。

原種子に要求される純度基準(一般栽培のナタネ原種子で99.9%、一般栽培のトウモロコシ原種子で99.5%)は、検討しているGMO含有の基準値に近く、原種子生産での必要条件(長い分離距離、入念な清掃、徹底した自生植物個体の除去)が、最良の指針になるかもしれない。

2.2 組換え農作物供給チェーン・イニシアティブ

組換え農作物供給チェーン・イニシアティブ(SCIMAC)は、英国植物育種家組合、全国農業者連合、英国農業供給取引組合と作物保護協会の協力事業である。SCIMACは除草剤耐性(HT)GM作物の導入のための業務規約と指針を開発した。これらの英国の指針⁵⁾は、HTGM品種を栽培する場合に採用すべき隔離距離を指定している。指針には、情報伝達と記録保存についての一連の助言があり、「除草剤耐性(HT)作物栽培のための適正な農業活動」について具体的に提言している。GM品種は、現在、英国では商業的に栽培されていないため、これらの指針は、現在進行している農家規模での試験のシリーズにのみ適用されている。さらに、SCIMACの規約で推奨されている分離距離は、現在、英国農業水産食料省(MAFF)の諮問の対象となっている。SCIMACの指針は法的な強制力を持たないが、商業的な契約の根拠となる。

このシステムの有効性を証明するデータは存在しない。それでも、これらの指針は、適正な農業活動を示して、混入を最小限に抑えるための有益な出発点となるだろう。

2.3 分離規約の実例

2.3.1 英国小売り組合/食品・飲料連盟の規約

英国小売り組合と食品・飲料連盟は、分別された従来品種の大豆とトウモロコシの供給についての、現在における最善活動に基づいた技術的基準を作った⁶⁾。この規

5) <http://www.cropprotection.org.uk/visitors/content/environment.htm>* を参照。

* (訳注) 上記のページはウェブサイトの再編によって、次の場所に変更されている。

http://www.cropprotection.org.uk/content/about/2_bio_guide.asp

6) <http://www.fdf.org.uk/fdfbrlaunch.html>* を参照。

* (訳注) 上のページは現在参照できないが、次のページが参考になる。

http://www.fdf.org.uk/pressreleases/press_010907.pdf。

約は、大豆とトウモロコシの分別 (identity preservation) を確保することによって供給チェーン全体での食品中への GM の混入を防止することを目的として、種子供給、植付け、栽培から、収穫、貯蔵、輸送まで、農家に多くのことを勧告している。これらの生産物を混合した商品には GM 表示は要求されない。供給者は、非 GM 大豆と非 GM トウモロコシの両方の供給に対する基準に従うことが奨励される。供給チェーンの関係者はこの基準を評価することが求められ、必要に応じて改定が行われることになっている。

この基準はつい最近に決められたため (2001年9月に公表)、農家に提案される (総合的な) 対策の有効性はまだ明らかではない。また、基準値は決められていない。

2.3.2 Soja de Pays (フランス国産大豆認定制度)

この制度は、フランス国内の家畜飼料用大豆の品質を保証された分別供給について、産業界からの要請が強まったために、1999年の春に作り出された。この制度は、畑から家畜小屋の給餌にいたるまでの追跡可能性を保証するため、供給チェーン全体を範囲としており、フランス国内の大豆の生産者、集荷業者、加工業者と利用者が緊密に協力しあっている⁷⁾。分離は、管理された非 GM 種子の購入と植付けから始められる。収穫時に、確認済みの指定されたサイロだけに、「Soja de Pays (国産大豆)」の名称がつけられる。該当する大豆粒とそれに由来する製品は、つねに、ほかの材料と混じらないような方法で輸送される。これによって、Soja de Pays の認証マークによる製品の完全な追跡可能性と保証を可能にしている。この制度は、家畜に与えるための脱脂大豆の品質保証のために作られたが、人間の食用に適する認証済み非 GM 大豆油の供給にも使われるようになっていく。

これらの要件は、栽培者、集荷業者と加工業者が互いに署名した契約の中に書きこまれており、この制度によって委任された独立した組織によって、ポリメラーゼ連鎖反応 (PCR) と他の抜き取り検査によってモニタリングされる。この制度の分別と追跡可能性の両面からもたらされる信頼によって、売り主はかなりの割増金を得る。2000年には135,000トンの大豆 (55,000ha および6,000生産者) がこの制度によって扱われたと推定される。

この制度は、欧州において GM 作物の分離のための

分別手法を適用した最初の制度の1つであり、興味深い参考事例である。Soja de Pays で取り扱われる製品への GM 混入の許容値は現在1%である。しかし、トウモロコシ、ナタネ、ジャガイモなどの作物では、この制度の手順を使って1%の基準値を満たすことは難しいと思われる。これらの作物は、他家受粉の可能性が高く (トウモロコシとナタネ) あるいはこぼれ種が種子バンクに加わることによる自生植物個体の発生が多い (ナタネとジャガイモ) からである。収穫後の手順が適用できる可能性は大きいですが、トウモロコシとナタネでは種子サイズが大豆よりも小さいため、混入の程度はより大きくなるだろう。

2.3.3 高エルカ酸ナタネ (HEAR)

エルカ酸含量が多いナタネ品種 (非 GM 品種) は産業油の生産に利用される。しかし、エルカ酸は栄養吸収阻害物質であるため、これらの品種がエルカ酸とグルコシノレートの両方が低い食品用のナタネ品種 (いわゆる二重低含量品種 (double low varieties)) に混入しないことが重要である。欧州と米国では、食用油中のエルカ酸のレベルは2%未満と決められている。

エルカ酸生産用ナタネの栽培に関する契約では、一般に次のことが指定されている。

- ・ 認証種子のみの使用
- ・ あらかじめ清掃した播種機の使用
- ・ 100m (英国とドイツ) から400m (フランス) の分離距離
- ・ 耕作・収穫機械の清掃の必要
- ・ 混入を防ぐためのナタネ種子の収穫後分離の重要性

英国、フランスとドイツには産業全体での基準はなく、混入の防止は契約で要求される検査と (作物の買入れ拒否を含む) 厳しい罰則によって進められている。

この研究において使われる基準値と比較すると、低エルカ酸品種への高エルカ酸品種の混入の許容値はかなり高い (2%)。100mの隔離距離を要求するドイツの種子会社によれば、実際には二重低含量品種のロットの95%以上ではエルカ酸含有量が0.2%未満であり、0.5%程度の種子ロットはごくわずかで、最高でも1%である。逆方向の交雑と混入 (高エルカ酸品種中への二重低含量品種) は検出がはるかに難しいため、50%以上のエルカ酸

7) <http://www.prolea.com/dossiers/index.htm> を参照。

を含んでいる種子ロットはすべて受け入れられる。これは、現在の業界の分離手順によって1%から2%の基準値には対応できるが、混入を1%未満に減らすには特別な予防措置を取らなければならないことを示している。他家受粉が発生しても交雑種子は高いエルカ酸生産を行わないため、4%の他家受粉があっても初めて油中のエルカ酸が2%に達する⁸⁾ので、なおさらである。したがって、エルカ酸に対する分離距離は、このプロジェクトが研究対象とするさらに低い許容値の適切な指針とはならない。

2.3.4 もちトウモロコシ

普通のトウモロコシのデンプンがだいたい75%のアミロペクチンと25%のアミロースを含むのに対して、もちトウモロコシ(waxy maize)は分枝したアミロペクチン態のデンプンの割合が高い(99%以上)。このため、もちトウモロコシのデンプンは、安定剤や増粘剤、あるいはサラダドレッシングの乳化剤として、加工食品への利用に適している。また、接着剤や紙製造にも利用される。分枝デンプンの割合の高いもちトウモロコシは、加工業者から割増金を受けるために一般のトウモロコシとは別にしておかなければならない。このため、種子混入を防ぐための栽培全過程での分別に加えて、他家受粉を防ぐための圃場での隔離が必要とされる。

欧州でのもちトウモロコシの生産は、現在約20万トンで、おもにフランスで生産されている。150万haのトウモロコシ生産面積のうちの25,000~30,000ha、とくにフランス南西部で、もちトウモロコシが栽培されている。国の規模ではマイナーなトウモロコシ品種であるが、関係する会社によって集められるトウモロコシの1%~20%を占めている。生産の要件は関係する会社と生産地域によって異なるが、共通な点がいくつかある。

- ・トウモロコシ子実の純度の最低基準はデンプン会社によって96%と決められているすなわち許容される混入率は4%である
- ・デンプンに対する簡易な発色検査(ヨウ素液を使う)が、もちトウモロコシ中の普通トウモロコシの割合を推定する安価な方法である。

・栽培は、通常、栽培する量(面積あるいは収穫量)と使用する品種とを明確に定め、分別の規則(隔離距離、もちトウモロコシ畑のグループ化)を示した契約のもとで行われる。認証ハイブリッド種子を使用しなければならない。もちトウモロコシの収穫を集中化してこの品種専用の乾燥機を使えるように、受渡し時期が決められていることも多い。

価格の割増しはトンあたり9%程度である。

もちトウモロコシでは混入種子の許容限度が高い(4%)ため、分離と清掃に用いる手順はGM/非GMの場合ほど厳しくする必要はない。さらに、もちトウモロコシには純度を推定するための信頼できる安価な手段があるが、GMトウモロコシの検出で同じような手段を用意することは難しい。

2.4 有機農業

EU理事会規則(EEC)2092/91(改訂版)は、有機生産の表示をつけて販売される作物についての要件を定めている。理事会規則(EC)1804/99は、有機生産物は、遺伝子組換え生物あるいはそれから由来する製品をいっさい使わずに生産しなければならないことをとくに規定している。規則(EEC)2092/91の第13条は、やむを得ない混入について、超えてはならない基準値をなるべく低く設定すると述べているが、その値は今のところまだ決まっていない。有機生産用の種子は有機生産されたものでなければならないが、2003年12月31日までは、限られた条件のもとで有機生産に非有機種子を使うことができる特例が用意される。

種子の混入と花粉の分散を最小にするためには、英国土壌協会(Soil Association)のような複数の認証団体による何らかの予防措置が必要と思われる。たとえば、土壌協会はナタネとトウモロコシについて6マイルまでの分離距離(風向、開花時期と局所地形による)と、各農家への立ち入り検査を規定している。英国農漁食料省(MAFF)が委託した最近の報告⁹⁾に概説されているように、GM作物混入ゼロを保証することは不可能であろう。また、ある種の低レベルのGM原料の検出は難し

8) Ingram, J. (2000). Report on the separation distances required to ensure cross-pollination is below specified limits in non-seed crops of sugar beet, maize and oilseed rape (テンサイ、トウモロコシ、ナタネの非種子用作物において他家受粉を指定制限値より低く保つために必要な分離距離についての報告)。英国農漁食料省(MAFF)委託研究。

9) Moyes and Dale (1999). Organic farming and gene transfer from genetically modified crops (有機農業と遺伝子組換え作物からの遺伝子拡散) 農漁食料省研究プロジェクト0157 John Innes Center (ジョンイネス・センター)、英国(1999年5月)

いかもしれない。このことは、基準値の設定が低すぎると、生産者にとって実行不能になることを意味する。

有機栽培農家のもう一つの心配は、受精が起ころなくとも作物にGM花粉がかかることが予想されることである。GM花粉自体が混入物とみなされるため、これが有機栽培農家の関心事となっている。(他の状況では問題にされないような)生存できない花粉にも配慮しなければならないが、これらは生きた花粉よりもさらに遠くまで運ばれると考えられるため、この問題を分離距離によって解決することは難しいかもしれない。

GM作物と有機作物とを同時に栽培する農家はないので、農家内で混ざる可能性は小さい。有機栽培と非有機栽培の原材料の混合を防ぐために、保管場所の分離や供給経路の区別などの対策がすでに採用されており、収穫後におけるGM作物の混入の可能性はきわめて低いであろう。

2.5 結論

作物品種の分離に適したシステムがいくつかある。分離の動機の大部分は分別された生産物への割増し価格である。どのシステムも、一般栽培作物と有機栽培作物へのGM作物の混入を最低限に抑えるためにそのまま採用はできない。多くの場合、これらのシステムで決められている基準値は、この研究で選択したものよりゆるやかである。もう一つの問題点は、認証種子生産やSCI-MACの指針の場合のように、生産規模が普通の作物生産よりもはるかに小さいことであろう。

要約すると、現在のところ、選択したモデル作物に変更せずにそのまま採用できる有効なシステムは存在しないようである。分別システムの一般的な特性をいくつか組み合わせて、それに応じて農業活動を適合させるほうが適切かもしれない。

3 GM作物の存在下での農業活動の変更の効果

この章では、非GM作物中へのGM品種の混入の確率を解析する。農業活動の変更が非GM作物の分離を向上させる効率を評価し、関連する諸費用を推定する。専門家の科学的意見とコンピュータのモデル(GENESYS、MAPOD)を組み合わせて、農家ででの混入率を推定し、解析対象の活動変更を評価するために使用した。

- ナタネについて、コンピュータ・モデル GENESYS を使用して圃場での混入を推定し、種子と作物の収穫後処理の間の混入については、英国とフランスの種子認証と農学の専門家委員会が、ドイツの研究者と協議しながら、推定した。
- トウモロコシについて、コンピュータ・モデル MAPOD を使用して圃場での混入を推定し、種子への混入と作物の収穫後処理における混入を、英国とフランスの種子認証と農学の専門家委員会が推定した。
- ジャガイモについて、専門家の意見のみを使用して、圃場での混入、種いもへの混入、および収穫後処理での混入を推定した。委員会を英国とフランスの専門家で構成し、ドイツとニュージーランドの研究者と協議した。

3.1 種子用ナタネの生産

3.1.1 作物の生産と利用

Brassica 属の3つの主要種、*Brassica napus* (ナタネ(セイヨウアブラナ) (oilseed rape)、ルタバガ(swede rape) など)、*Brassica oleracea* (キャベツ、カリフラワー、芽キャベツ(sprouts) など)と *Brassica rapa* (カブ(turnip)とturnip rape)が、欧州で商業的に栽培されている。欧州では、*B. napus* がもっとも広く栽培される *Brassica* 属作物であり、現在の生産量の約95%を占めている。ナタネ(*B. napus sp. oleifera*)は、春ナタネと冬ナタネの両方の時期に作られ、大豆油とパーム油に次いで世界で3番目に重要な油料作物である。食用油と家畜飼料を生産する品種(エルカ酸含有量が2%未満でグルコシノレート含有量が低い)が、二重低含量品種として知られている。これらの品種は、当初、カノーラというブランド名でカナダで開発された。

欧州における冬ナタネの最大の栽培地域はフランスとドイツであり、それぞれ100万ha以上で栽培されている。この2ヵ国と、もっとも小規模な栽培地域である英国と北欧諸国が主要な栽培国であり、育種、新品種の開発と種

子生産が行われている。2000年には、フランスとドイツはそれぞれ3000haで第2世代種子と第3世代種子を生産した。フランスの農家が使用している種子の20%~25%程度は、その農家で栽培した作物からの保存種子である。英国とドイツでも同様な割合で農家保存種子が使われている。

ナタネは一般に畑作農家で栽培され、一部は混合農家でも栽培されている。通常、認証種子の生産は、専門の種子業者と、種子生産についての厳密な手順を採用できる農家との契約のもとで行われる。認証種子生産に関するEU規則では、他のナタネ作物のいずれとも100m以上の分離距離を保たなければならない。さらに、種子生産圃場の前作は、種子生産と両立しないものであってはならない。OECDの種子制度では、その圃場で *Brassica* 属作物を栽培したときは、5年以上の期間をおかなければ使用してはならない。EUのいくつかの加盟国では、種子生産者はもっと長い期間、たとえば7年以上の期間をおいている。

ハイブリッド種子の生産では、圃場の周辺部と圃場の中に帯状に播種された花粉供給用の植物が、種子生産用の雄性不稔植物と1:3または1:4の比率で一緒に栽培される。ハイブリッド認証種子の生産について、EU法令は他のナタネ作物のいずれとも300m以上の分離距離をおくことを要求している。

原種子と認証種子の純度は、欧州法(指令69/208/EEC、ならびに、98/173/EECと99/84/EECによって拡張された委員会決定95/232/EEC)の要求では、一般栽培の原種子が99.9%、一般栽培認証種子が99.7%、認証ハイブリッド種子が90%である。

農家保存種子の生産に対する規制は、食用と家畜飼料用に播種される種子のグルコシノレートとエルカ酸の含量が決められた最高レベルより低くなければならないことを除いて、存在していない。種子は、通常、ほんの短い輪作やほかのナタネ類作物の後に加工用に栽培された通常の作物から採種されることも多い。

最近、オーストリア、デンマーク、ドイツ、スコットランド、スウェーデンとスイスでは、有機栽培種子と有機栽培油を隔離するために用意した植物をすき込むところから有機栽培ナタネの生産を始めるようになっている。冬ナタネは雑草管理の問題があるため、いままでのところ作物の大部分は春ナタネである。また、ほとんどが一般栽培の認証種子または農家保存の有機栽培種子を使って栽培されていた。だが、欧州では、新たな有機栽培

培基準を満たすために有機栽培種子の生産が開始されている。ただし、有機栽培種子の生産システムを採用している種子会社はまだ少ないため、使用されている種子の多くは一般栽培の認証種子を使って有機栽培農家で栽培された農家保存種子である。

EU では、GM ナタネは商業的生産のためには栽培されていない。EU は雄性不稔の除草剤耐性発現系統のいくつかについて、栽培目的の市場流通に同意しており、将来これらの品種は登録されるだろう。GM ナタネ品種の一つについては (EU で加工するための) 輸入が許可されている。

3.1.2 混入の経路

GM 混入は、生産、収穫から収穫後処理までのさまざまな段階で生じる。もっとも重大な混入源を以下に示す。

3.1.2.1 花粉による遺伝子流動

B. napus は、おもに自家受粉をするが、異系交配 (他家受粉) も12%から47%のレベルで起こると推定されている¹⁰⁾。他家受粉はおもに隣接する植物の物理的な接触で起こるが、風と昆虫によって花粉も長い距離を運ばれる。

風と昆虫によるナタネの花粉の分散の程度が広く調べられているが、環境や地形の条件、あるいは使用した研究方法が異なっているために、結果は大きく異なっている¹¹⁾。4 km 以上の距離でも、さまざまなレベルの他家受粉が記録されている。ナタネの組合せ品種 (varietal

associations) は、自殖性の高いナタネ品種と比較すると、他家受粉の影響を受けやすい¹²⁾。

3.1.2.2 種子による遺伝子拡散

ナタネでは、本来の脱粒と収穫機による作物のかく乱とによって、種子の損失がかなりある。収穫の条件が悪いと全収量の約50%の損失が生じることが、MacLeod¹³⁾によって報告されており、20%から25%程度の損失は珍しくない¹⁴⁾。理想的な条件では、2%から5%の損失が報告されている。ナタネの種子は、少なくとも5年間¹⁵⁾、おそらく10年間¹⁶⁾にわたって、土壌中で生存できるが、二次休眠の発達にはかなりの遺伝子型変異がある。

こぼれ落ちた大量のナタネ種子は、自生植物によって、とくに広葉作物の栽培時には、抑制が難しい深刻な問題を引き起こし、次に栽培されるナタネ作物への混入が問題となる。自生ナタネは、穀類の輪作や、畑周辺、路側、土置き場に共通した一般的な雑草である。ナタネ個体群が野生化することはあまりない。多くの個体群はすぐに死滅するが、圃場や周辺の農用地で少なくとも10年にわたって存続する場合もある。作物と野生個体は *B. napus* が大部分で、一部の地域で *B. rapa* の作物と野生個体、あるいは野生の *B. rapa* が共存している¹⁷⁾。

ナタネ種子は、作付けされた圃場に残るだけでなく、機械について他の圃場へ意図されずに持込まれたり、農家内の移動経路に沿ってこぼれ落ちたりする。他の作物の混入は、自生植物からの遺伝子流動や、自生植物が作物とともに収穫されることによって生じる。

10) Becker, H. C., Karle, R. & Ham, S. S. (1992) *Theoretical and Applied Genetics* 84 : 303-306.

11) Thompson, C. E., Squire, G., Mackay, G. R., Bradshaw, J. E., Crawford, J. & Ramsay, G. (1999). *Gene Flow and Agriculture: Relevance for Transgenic Crops* (遺伝子流動と農業: 遺伝子導入作物の意義) Lutman, P. (ed). BCPC Symposium Proceedings No.72; Timmons, A. M., O'Brien, E. T., Charters, Y. M., Dubbels, S. J. & Wilkinson, M. J. (1995) *Euphytica* 85 : 417-423; Stringham, G. R. & Downey, R. K. (1978) *Can. J. Plant Sci.* 58 : 427-434; Downey, R. K. (1999) *Gene Flow and Agriculture: Relevance for Transgenic Crops*. Lutman, P.(ed). BCPC Symposium Proceedings No.72; Stringham, G. R. & Downey, R. K. (1982) *Agronomy Abstracts* pp 136-137.

12) Simpson, 未発表データ

13) Macleod, J.(1981) *Oilseed rape book. A manual for growers, farmers and advisors*(ナタネブック: 栽培業者、農家と助言者のためのマニュアル) Cambridge Agricultural Publishing. 107-119.

14) Price, J. S., Hobson, N., Neale, M. A. & Bruce, D. M.(1996) *J. Agric. Engang Res.* 65 : 183-191.

15) Lutman, P. J. W. (1993) *Aspects of Applied Biology* 35, Volunteer crops as weeds(応用生物学の諸局面35 雑草としての自生作物) pp. 29-36; Schlink, S. (1994) *Okologie der Keimung und Dormanz von Kornerraps (Brassica napus L.) und ihre Bedeutung fuer eine Uberdauerung der Samen im Boden*(ナタネの発芽・休眠生態と地中種子の生存への影響) PhD Thesis, University of Gottingen, Germany; Schlink, S. (1995) *Proceedings 9 th European Weed Research Society Symposium. Challenges for Weed Science in a Changing Europe*(第9回欧州雑草研究会シンポジウム 変化する欧州における雑草学の課題) Budapest, pp. 65-72.

16) Saueremann, W. (1993) *Raps.* 11 (2); 82-86.

17) Squire, G. R., Crawford, J. W., Ramsay, G., Thompson, C. & Bown, J. (1999) Lutman, P. (ed). BCPC Symposium Proceedings No.72.

この研究の目的のためには、いくつかのアブラナ科雑草は作物の導入遺伝子を獲得でき、交雑によって非 GM 作物に逆に転移しうる遺伝子が蓄積する場となることを認識することが重要である。さらに、一部のアブラナ科雑草の種子は、収穫された作物への混入物となり、導入遺伝子を含んでいれば、非 GM 作物の中の GM 成分の混入レベルを高めることになる。ただし、これが生じる頻度は低く、重要度は自生植物からの遺伝子流動のレベルよりもはるかに低いだらう。

3.1.2.3 非意図的な混合

作物の栽培技術と収穫後の取扱いは、考えられる混入に関して大きな役割を果たす。非 GM 作物中への GM 成分の混入は、栽培、収穫、取扱い、貯蔵、輸送を通して、さまざまな段階で発生しうる。考えられる混入源は、播種機、耕作機械、収穫機、輸送車両と、貯蔵、精選、乾燥設備である。

3.1.2.4 種子の純度

作物の生物学的特性によって影響される混入とは別に、購入種子の純度は収穫物における混入レベルにかなり影響する。現在、欧州では GM ナタネの生産が行われていないため、EU で生産されるナタネ種子への混入はほとんどない。この状況は、今後、GM 作物がもっと広く商業的に栽培されるようになると変わるだらう。GM ナタネは EU のいくつかの国で研究と育種の目的で栽培されている。一方、たとえばカナダからの輸入種子には、すでに GM 品種が混入していることがある。2000 年 5 月には、Advanta 社がカナダから輸入したナタネ種子に、EU では未承認の GM 品種が混入していることが明らかになった。1999 年と 2000 年には、GM 品種が混入した種子がいくつかの加盟国で販売、栽培されたが、混入レベルは 1% 未満であった。2001 年には、フランスの「Direction generale de la concurrence, de la consommation et de la repression des fraudes (競争・消費者問題・不正行為防止総局)」が、フランスに流通している種子の中にごく低いレベル(0.2% 未満)の GM 成分の混入があることを検出した。

3.1.3 代表的な農家タイプ

冬ナタネが、EU のおもな生産地域(フランスとドイツ)で研究された。農業活動の変更の効果を評価するため、各種の農家タイプを設定した。認証種子生産を研究するため、南西フランスのタルネガロンヌ(Tarn-et-

Garonne) 県と西ドイツのヴェストファーレン(Westphalia) 地方の、一般栽培農家 1 とそれに対応する有機栽培農家 2 (同じ規模) と農家 2' (小規模有機栽培農家) を設定した。これらの農家は種子生産に特化しているため、ナタネ種子を分離するための十分な機器と貯蔵設備を備え、作業者は認証種子生産の取扱いについてかなりの経験を持っている。すべての農家タイプについて、最低限の種子作物管理(たとえば休閑管理に関するもの)を現在の活動として想定した。種子会社は、契約農家との間でもっと多くの要件を取り決めているかもしれない。他家受粉と自生植物個体はこれら認証種子生産農家にとっての主要な混入源である。収穫後の作業は、分離システムがすでに実施されているので、重要な問題ではない(認証種子生産農家および有機栽培農家)。

農家 3 と農家 4 は、通常の販売用の作物から採種した種子を使用する典型的な一般栽培(農家 3) と有機栽培(農家 4) の農家である。これらは中央フランスのブルゴーニュ(Bourgogne) 地方と東ドイツのザクセン(Sachsen) 州にある。これらの農家は面積が農家 1 や農家 2 より大きく、区画も大きい。一般栽培農家は近隣農家と種子を交換したり機械を共有したりし、(収穫作業などに) 請負業者を利用している場合もある。GM 作物専用の機械や貯蔵設備は持っていない。

各農家タイプの特性を表 1 に要約する。

3.1.4 コンピュータ・モデル GENESYS

混入率に対して予想される農業活動変更の影響を評価するため、GENESYS というコンピュータ・モデルを使用した。GENESYS はフランス国立農業研究所(INRA) によって開発され、除草剤耐性の冬ナタネから自生ナタネ類への、種子による時間的遺伝子拡散、および花粉と種子による空間的遺伝子拡散の、両方の可能性を考慮して栽培体系を評価できる。このモデルは作物だけでなく種子の生産にも適用でき、INRA によってハイブリッド種子の生産をシミュレートできるように改造された。

GENESYS には以下のさまざまな入力変数が組み込まれている。

- (i) 圃場と、自生植物がある圃場の周囲や道端(以後「境界部」と呼ぶ)からなる、その地区の圃場配置、
- (ii) 各圃場での輪作、
- (iii) 各作物に対する栽培技術。これらの技術中には、間作、播種床のための耕運、播種日と種子の量、

除草剤の散布、除草日、ナタネ収穫時の種子損失、
(iv) ナタネ品種の導入遺伝子のタイプ、優勢対立遺伝

子Aが劣性対立遺伝子aか、そして遺伝子型が含まれる。

表1 ナタネ農家の各タイプの特徴

農 家	1				2		2'		3				4	
生産地域	Tarn-et-Garonne (フランス) / Westphalia (ドイツ)						Bourgogne (フランス) / Sachsen (ドイツ)							
生産方法	一般栽培				有機栽培		有機栽培		一般栽培				有機栽培	
生産物	種子生産				種子生産		種子生産		種子 ⁽¹⁾ と穀粒生産				種子 ⁽¹⁾ と穀粒生産	
総面積 (ha)	633				633		325		633				633	
農家の農地面積 (ha)	131				131		13		351				351	
農家のナタネ圃場の比率 (%)	10-12				10-12		10-12		20				20	
圃場の平均サイズ (ha)	6				6		1		10-12				10-12	
種子生産圃場の数	1または2				1または2		1		6-7				6-7	
農家外のGM作物の比率 (%)	10	50	10	50	10	50	10	50	10	50	10	50	10	50
農家内のGM作物の比率 (%)	0				0		0		0				0	
(1): 農家保存種子														

このモデルでは、栽培ナタネと自生ナタネ植物の両方に関して、収穫時の種子バンクとそこからの幼植物の発生から始まるナタネの生活環が組み込まれている。これらの幼植物の一部が育成して開花し、新しい種子を作り、その一部が季節の終わりに種子バンクに追加される。シミュレートした1年の終わりに、ナタネの生活環の各段階と各圃場について、面積あたりの個体数(種子バンク中の種子の数や幼植物の数など)と3つの可能な遺伝子型 AA、Aa、aa (Aは導入遺伝子)の比率を計算する¹⁸⁾。

このモデルは、現在、農家の圃場、あるいはフランス

油糧種子総合技術センター (CETIOM) と他の研究機関が実施した GMO 圃場試験から集められた独立したデータを用いて評価されている¹⁹⁾。シミュレーション結果と試験結果との最初の比較では、収穫種子への混入率がやや少なめに推定されるが概算としては信頼できることが示された。GENESYS は、圃場での混入の機会を低くするためのさまざまな栽培方法の効果や、ある品種特性の重要度を比較するために使用できる。推定の誤差を考慮し、圃場内混入を最小にする農業活動を選定する際には、安全範囲を使用した。

18) Colbach N., Clermont-Dauphin C. and Meynard J.M., 2001 a. Agric. Ecosyst. Environ., 83, 235-253 ; Colbach N., Clermont-Dauphin C. and Meynard J.M. 2001 b. Agric. Ecosyst. Environ., 83, 255-270.

19) Champolivier J., 1997. Etude de l'impact de colzas résistants aux herbicides dans les systèmes de culture. 1ère année d'expérimentation. Synthèse des essais inter-instituts-Campagne 1995-96 (栽培システムに対する除草剤耐性ナタネの影響の調査初年度試験 各地域研究機関の1995-1996年試験結果のまとめ). CETIOM, 22 p ; Champolivier J., Messéan A. and Gasquez J., 1997. Bull. GCIRC, 14, 63-66 ; Berl M., 2000. Rapport DAA-INA P-G, 69 p. + annexes.

3.1.5 シミュレーションに用いる仮定

シミュレーションのために、次の入力データを使用する。

- 地区の総土地面積。
- 農家タイプの特性(区画サイズ、栽培体系、圃場配置;表1を参照)。
- GMOの割合は、地区内で10%または50%である。対象とする一般栽培農家も、農家内でGM作物を栽培する。
- 認証種子生産者は、ハイブリッド種子を生産する(農家1、2、2')。近隣の農家では完全に稔実するナタネ品種を栽培している。ハイブリッド認証種子の生産の基準(種子生産年に300mの隔離距離をおく6年輪作)がシミュレーションに組み込まれた。
- 農家保存種子の場合(農家3、4)は、自殖性の高い品種が栽培されている。
- GMナタネは、除草剤耐性について優性対立遺伝子(A)を持ち、遺伝子型は遺伝子導入品種ではAA、非GM品種ではaaと想定する。
- 認証種子生産の圃場と他のナタネ圃場の最低距離は300mである(ハイブリッド品種の生産)。農家保存種子(農家3と農家4)については、隔離距離は法律では要求されていない。
- シミュレーション開始時の種子バンクには混入がなく、最初の播種には混入のない種子が使われる。
- 一般栽培農家1と3については、提案された農業活動の変更が、周囲の農家でも実施される。有機栽培農家の場合は、変更はその農家のみで行われる。
- 農家保存種子(農家3と農家4)の場合、その地区の農家はすべて、農家保存種子を使っている。

3.1.6 シミュレーション結果の一般的な説明

モデリングの結果を解釈する際には、この研究で示す結果は中期的な効果であり、しかも平均的な値であることに注意しなければならない。農家1、2、2'と4は、6年輪作システムを使っているが、通常のナタネについての結果は輪作の2回りめ(7年めから13年め)認証種子生産圃場では、13年めに該当する。結果は、農家3でも2回りめの輪作にあたるが、輪作の周期が短いので、4~6年めを意味している。

また、モデルは相対的な結果を示しており、悪天候や農家での事故などの好ましくない状況はまったく考慮していないことにも注意が必要である。さらに、3.1.5節で述べている、シミュレーションに使う仮定からも、そ

の結果を一般化する可能性は限られている。

3.1.7 GENESYSによって評価した圃場内混入の抑制対策

ナタネでは、圃場内で混入が生じうる主要な経路は次のとおりである。

- 種子への混入(とくに農家保存種子)
- 他家受粉
- 自生ナタネ

これらの混入源からの混入の可能性を最小限に抑えることのできる栽培技術がいくつか知られている。技術の多くは、野生個体群と自生植物の除去のためにすでに使用されている。

- 除草剤によって雑草除去の効率を向上させること(シミュレーション2、3)
- 種子バンクの影響を抑えること(何種類かの土壌耕起法がテストされている)(シミュレーション5、6)
- 刈取りまたは選択的除草剤の使用によって、圃場の境界部の個体群を除去すること(シミュレーション10、11、12)
- 春に休閑地に播種することによって自生ナタネの成育を防ぐこと(シミュレーション13)。最近では、休閑地の耕起がすでに実施されていることが多いが、春に休閑地に播種することで、自生ナタネをもっと効率的に減らすことができると思われる
- 種子生産圃場の周辺300mでは、ナタネを含まない輪作を行う(シミュレーション18)
- 自生ナタネが花をつけられないような春作物を導入して、輪作周期を長くすること(シミュレーション15)

混入率への効果を向上させるため、これらの技術を組み合わせることもできる(シミュレーション14)。

他の技術が、他家受粉の抑制についてテストされている。

- 非GMナタネとGMナタネの播種時期をずらすことによって、開花期の他家受粉を回避すること(シミュレーション7、8、9); 非GMナタネの播種期を遅らせると、非GMナタネを播種する前に自生ナタネを駆除することも可能になる(シミュレーション8、9)
- 景観の中での種子生産圃場の位置と、圃場配置のタイプ(シミュレーション16、17)

種子の純度に関しては、農家保存種子の代わりに市販

種子を使う（農家3と4）効果をシミュレーションする（シミュレーション19）。

3.1.8 農家1：一般栽培による認証種子の生産

表2に、農家1の現在の作物管理を示す。農家と地区内では次に示す輪作を実施している。

- ・ R/WW/WW/SA/WW/SC
- ・ SC/WW/WW

R = ナタネ； SA = 休閑； SC = 春作物； WW = 冬小麦
種子生産圃場では穀物と春作物で長期の輪作が行われ

るため、雑草と自生ナタネは最小限に抑えられている。ナタネは農用地面積の10%を占めているので、少なくとももう一つの輪作が農家内に存在する。この地区内のこの種の輪作は、通常、春作物で始まり、その後1回か2回の穀物が栽培される。さまざまなシミュレーションに必要な全体的なナタネの割合とGMナタネの割合が得られるように、2つの輪作を地区内に無作為に配置する。ある圃場が種子生産に使われるときには、同じ年の他のナタネ作物は300m以上離して配置する。

表2 農家1における現在の作物管理

作物	刈り株 破碎	土壌耕起	播種日	播種密度 (種子/m ²)	刈取り	除草剤 (播種時+春)		収穫ロス
						タイプ	自生ナタネ の枯死率	
境界部					なし			
GMナタネ	あり	チゼル	8 / 30	70		選択性	95%	5 %
非GMナタネ	あり	チゼル	8 / 30	70				5 %
採種用ナタネ	あり	チゼル	8 / 30	70				5 %
冬小麦	あり	チゼル	10 / 3	350		非選択性	95%	
春作物	あり	チゼル	3 / 1	350		非選択性	95%	
休閑地					4月中旬			

図1 モデルで検討された農家1の周辺地区の地図（左：分散した圃場配置；右：境界部の位置）

地区内における農家 1 の圃場配置が図 1 に示されている。この圃場配置を森林が囲み、花粉も種子もこの地区には入らない。農家 1 の圃場 (灰色) はこの地区全体に

分散している (図 1 左)。6 年ごとにナタネ種子生産に使用される圃場は地区の中央にある。黒い線は道路を示しており、境界部がこれに沿って存在する (図 1 右)。

表 3 農家 1 における現在の農業活動で予想される混入率

農家 1	農家内 / 農家外での GM ナタネの割合			
	0 % / 10 %	10 % / 10 %	0 % / 50 %	50 % / 50 %
	現在の活動			
圃場内での混入 (%) ⁽¹⁾	0.2	0.2	0.4	0.4
他の経路からの混入 (%) ⁽²⁾	0.02	0.02	0.02	0.02
予想される合計混入 (%)	0.22	0.22	0.42	0.42

(1): シミュレーション 1 (表 4) による結果
 (2): 播種、耕作機械、収穫、圃場から農家への輸送、貯蔵と清掃、農家からの輸送など。

農家 1 では、冬ナタネの認証種子生産のために 1 つの圃場 (6 ha) を、一般栽培のナタネでもう 1 つの圃場 (6 ha) を毎年栽培している。現在の農業活動で、この地区内と農家に異なった割合 (10 %、50 %) の GMO が存在する場合の状況を表 3 に示す。収穫後業務では問題が起

きないことは明らかである。圃場内での花粉や種子による混入は、GMO の比率によっては問題になる。農家内の GMO の比率は種子生産における混入レベルを増加させないが、地区内の GMO の比率は重要と思われる。

表 4 農家 1 の栽培技術についての変更案の説明 (GENESYS モデルでシミュレート、分散圃場配置)

	輪作	除草剤 - 自生ナタネ枯死率 W	作物管理							GM ナタネの収穫口ス
			土壌耕起		播種日		境界部		休閒	
			W+Sc	R	GM ナタネ	非 GM ナタネ	刈取り	除草剤	播種	
1	RWWSaWSc	0.95	チゼル	チゼル	30/ 8	30/ 8	なし	なし	なし	5 %
2	RWWSaWSc	0.8	チゼル	チゼル	30/ 8	30/ 8	なし	なし	なし	5 %
3	RWWSaWSc	0.99	チゼル	チゼル	30/ 8	30/ 8	なし	なし	なし	5 %
4	RWWSaWSc	0.95	チゼル	チゼル	30/ 8	30/ 8	なし	なし	なし	10%
5	RWWSaWSc	0.95	チゼル	ブラウ	30/ 8	30/ 8	なし	なし	なし	5 %
6	RWWSaWSc	0.95	ブラウ	チゼル	30/ 8	30/ 8	なし	なし	なし	5 %
7	RWWSaWSc	0.95	チゼル	チゼル	14/ 9	15/ 8	なし	なし	なし	5 %
8	RWWSaWSc	0.95	チゼル	チゼル	15/ 8	14/ 9	なし	なし	なし	5 %
9	RWWSaWSc	0.95	チゼル	チゼル	30/ 8	14/ 9	なし	なし	なし	5 %
10	RWWSaWSc	0.95	チゼル	チゼル	30/ 8	30/ 8	4月中旬	なし	なし	5 %
11	RWWSaWSc	0.95	チゼル	チゼル	30/ 8	30/ 8	5月中旬	なし	なし	5 %
12	RWWSaWSc	0.95	チゼル	チゼル	30/ 8	30/ 8	なし	選択性	なし	5 %
13	RWWSaWSc	0.95	チゼル	チゼル	30/ 8	30/ 8	なし	なし	春	5 %
14	RWWSaWSc	0.99	チゼル	ブラウ	15/ 8	14/ 9	5月中旬	なし	春	5 %
15	RWWSaWScSc	0.95	チゼル	チゼル	30/ 8	30/ 8	なし	なし	なし	5 %

R = ナタネ ; W = 小麦 ; Sa = 休閒 ; Sc = 春作物
 注 : 太字は変更を示す ; シミュレーション 1 は現在の農業活動を示している

3.1.8.1 GENESYS による農家 1 のシミュレーション
 表 4 は、作物管理と輪作システムのさまざまな変更 (3.1.7 節を参照) を評価するために使用したシミュレーション 1 から 15 までを説明している。シミュレーション 1 は現在の活動を示している。シミュレーション 16 から

18 は圃場配置と隔離距離の変更を説明している (以降を参照)。
シミュレーション 16 : 圃場配置を分散型から集団型に変更する (図 2)。種子生産圃場 (濃い灰色) は集団の端にあり、農家外の圃場に隣接する。

シミュレーション17：圃場配置を分散型から集団型に変更する（図2）。種子生産圃場（黒色）は集団の反対の端にあり、地区の端にあって農家外の圃場から保護されている。

シミュレーション18：ナタネを含む輪作は種子生産圃場から300m以上離れている。そのため、圃場が種子生産に使われない年でも近くにはナタネ作物がない。

図2 農家1の集団化した圃場配置
（シミュレーション16と17における圃場配置）

各シミュレーションのもとで、農家1について GENESYS モデルを実行した結果が表5に要約されている。結果は中期（13年め）の非 GM 種子生産圃場での収穫種子中の GM 種子の割合（%）で表されている。これらはシミュレーションの結果であり、いくつかの仮定に基づいていることに注意が必要である。また、計算に使ったモデルが出力した数値の絶対的な値は正確ではない。ここで示す結果は、異なった農業活動の混入を低減する効果を評価するために使用できる。

以下では、各シミュレーションについて得られた結果について述べる。

混入率は、地区内に10%の GM ナタネがあるときより、50%の GM ナタネがあるときの方が、概して高い。農家内で栽培される GM ナタネの割合の影響はあまり大きくない。おもな要因は地区内の GM 作物の割合と考えられる。

シミュレーション2、3：自生ナタネの量が非常に多いため、冬小麦における除草剤の殺草率の影響はほとんどない。

シミュレーション4：GM ナタネの収穫ロスが増加すると、より多くの GM 種子が圃場に残留して自生ナタネになるため、混入率が高まる。

シミュレーション5：ナタネ作物をまく前に耕起をすると、種子が深く埋められてナタネ作物に混じって芽を出せなくなるため、一般栽培ナタネへの混入は減る。ただし、種子生産畑と GM ナタネ圃場との距離が300m程度なので、その効果は小さい。

シミュレーション6：冬小麦と春作物の前に耕起をすると、種子が土に埋められて種子の生存率が高まり、非 GM ナタネへの混入が増加する。多くの種子が次のナタネ栽培の前に圃場が耕されるまで生存しており、耕起によって地中の種子が地表に出ることになる。この結果を考慮して、他の配置ではこのシミュレーションを行わなかった。

シミュレーション7：非 GM ナタネの播種を早め、GM ナタネの播種を遅らせて、GM ナタネと非 GM ナタネの開花時期をずらすことは、混入を増加させる。同時に開花している期間はたしかに短くなるが、播種を早めることで非 GM ナタネの中に自生ナタネが発生しやすくなる。その上、非 GM ナタネの開花が、境界部や休耕地内での自生ナタネの開花と大きく重なることになるため、遺伝子流動の可能性が大きくなる。この結果を考慮して、他の配置ではこのシミュレーションを行わなかった。

シミュレーション8、9：非 GM ナタネの播種だけを遅らせること（シミュレーション9）、あるいはそれと同時に GM ナタネの播種を早めることを組み合わせること（シミュレーション8）によって、非 GM ナタネの中の自生ナタネの発生が減り、混入が大きく減少する。境界部や休耕地内の自生ナタネと GM ナタネの開花時期が重なることの影響は、2つのシミュレーションの間に差がほとんどないため、大きくはないと考えられる。

シミュレーション10、11：境界部の刈取りは混入率をわずかに減少させる。刈取りの効果は、境界部の自生ナタネの開花が遅れる（刈取り時期が早い場合）か、あるいは種子生産が不可能になる（刈取り時期が遅い場合）ことによる。地区内に50%の GM ナタネがある状況では、GM 自生ナタネが多くなるため、境界部の刈取りの効果は10%の場合より高い。GM 自生ナタネの種子生産が防止できるので、遅い時期の刈取りを選択する方がよい。

シミュレーション12：グリホサート耐性の GM 品種の場合、境界部へのグリホサート散布は混入を大きく増加させる。グリホサートは非 GM 自生ナタネだけを枯らすため、残った GM 自生ナタネによる花粉と種子の生産が増える。自生ナタネ全体の量がもっと少ないときは、この悪影響はさらに大きくなる。地区内のナタネの50%

がすでに GM になっていて、GM 自生ナタネの割合が高いときは、グリホサートの影響は小さくなる。

シミュレーション13: 春季の播種によって休閑地管理を改善することは、混入を減らす非常に有効な方法である。春化処理の不足と作物収穫までの期間が短いことによって、自生ナタネ類が春まき作物の中で花粉も種子も作れなくなるためである。

シミュレーション14: 休閑地への被覆植物の春季播種、冬小麦中の自生ナタネ類の除草剤殺草率の向上、ナタネ栽培前の耕起、非 GM ナタネの遅播きを組み合わせると混入はさらに減少する。しかし、作業量の増大と比較すると、農家内のナタネへの効果は小さい。

シミュレーション15: 輪作周期を長くすることは、6年後よりも7年後のほうが前回のナタネ栽培後に生き残った種子が少なくなるため、農家内と農家外の混入を抑制する有効な方法である。さらに、輪作に追加される作物が春作物であると、自生ナタネは花粉も種子も生産できないため、その先のナタネ栽培での種子バンクがかなり減少する。追加される作物が自生ナタネの繁殖に有利なものである場合は、輪作を長くすることは逆効果になるだろう。GM 作物の割合が50%に高まると、長期輪作の効果は小さくなる。種子バンクの縮小は混入レベルにとってあまり重要ではなくなるからである。

シミュレーション16、17: 農家の圃場を集めて一つの集団にすることによって、ナタネ圃場を混入から保護することができる。ハイブリッド種子生産圃場を農家外の圃場から遠く離して設置することにより、混入がさらに少し減少する(シミュレーション17)。農家内で GM ナタネも栽培される状況(50%/50%と10%/10%)では、圃場の集団化によって、同じ農家内の GM ナタネ圃場から認証種子圃場への混入の可能性が高まる(シミュレーション16)。この場合は、地区の端に近く、中央部からの花粉の流れが少ない場所に種子生産圃場を置くと、混入レベルが低下するだろう(シミュレーション17)。

シミュレーション18: 農家の圃場が地区内に分散している場合でも、フランスで普通に行われるように、種子生産圃場の周辺圃場では、種子生産期間外もナタネを栽培しないことで、混入レベルを劇的に減らすことができる。ただし、これには近隣の農家のかなりの協力が必要である。

シミュレーション18を除いて、すべての GM ナタネ圃場から300m以上離れたところにあるハイブリッド種子生産圃場では、農家内のほかの非 GM ナタネ圃場よりも、分離の効果はかなり小さいことが多い(結果は示していない)。

表5 農家1におけるナタネ種子生産での推定混入率

農家1 シミュレーション	非GMナタネ種子生産におけるGM種子(%)*			
	種子生産圃場			
	農家内/農家外のGMナタネの割合			
	0%/10%	10%/10%	0%/50%	50%/50%
1	0.20	0.20	0.40	0.40
2	0.21	0.20	0.41	0.41
3	0.20	0.20	0.41	0.41
4	0.26	0.25	0.46	0.46
5	0.20	0.15	0.3	0.3
6	0.49	-	-	-
7	0.06	-	-	-
8	0.06	0.06	0.10	0.10
9	0.19	-	-	-
10	0.20	0.19	0.25	0.25
11	5.4	0.20	0.20	0.20
12	0.01	5.4	6.0	6.0
13	<0.01	0.01	0.02	0.01
14	0.03	<0.01	<0.01	<0.01
15	<0.01	0.08	0.17	0.17
16	<0.01	0.20	0.01	0.31
17	<0.01	<0.01	<0.01	0.02
18	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

* ハイブリッド種子生産について、輪作周期の13年めの値を示す

3.1.8.2 混入レベルの時間的な変化

地区内に10%と50%のGMOが存在するとき、農家1の現在の活動を使った長期のシミュレーションは、混入レベルが連続的に増加して、80年から90年後に最大値となって安定することを示している(図3)。上に述べたような中期シミュレーションの結果を考える際には、このような変化が予想されることにも注意しなければならない。

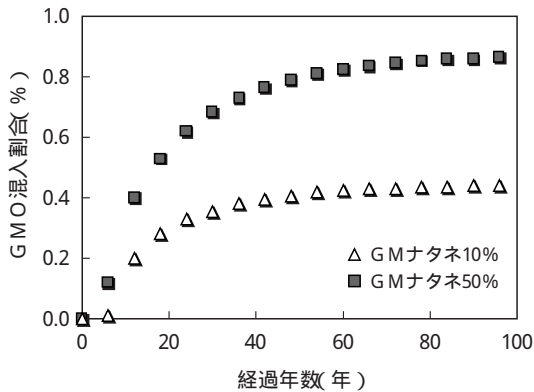


図3 農家1におけるハイブリッド種子生産への混入率の経時的変化(農家外に10%あるいは50%のGMナタネが存在する場合)

3.1.8.3 農家1についての結論

モデル GENESYS はシミュレートされた農業活動の間で混入レベルを比較するのに適しているということ、ここでも強調すべきであろう。得られた絶対的な値は(概算としては正しいが)あまり正確ではない。モデルの調整のための予備実験によると、混入レベルは過小評価されているらしい。このため、この結果はさまざまな農業活動の混入低減効果を比較することにもっとも適している。

地区内でのGMナタネの割合が10%であると想定すると、種子生産における現在の農業活動のままで0.3%の基準値を達成できるだろう。この結果は、最初の種子バンクにはGMナタネの混入がないと仮定したときの中期的な影響の推定に基づいていることに注意する必要がある。その上、ここで推定された混入率(現在の活動で0.22%)は初めから基準値に近い。一般に混入率は時間をかけて増加するので、これらの業務を継続すると次の輪作では農家にリスクが生じるかもしれない。

地区内のGMナタネの割合が50%の場合、0.3%の基準を達成するためにもっとも適した活動は次のとおりである。

- 4月中旬または5月中旬に境界部の刈取りをすること(シミュレーション10と11)。この方法を実施できるかどうかは、近隣農家の善意と、道路脇の管理が実際に有効に行われるかどうかにかかっている。農家がこれらの活動を採用する別の誘因は、それが病害虫の供給源を断つ方法でもあるということである。
- 春作物を追加したもっとも長期の輪作に変更して(シミュレーション15)、自生ナタネを抑制する。
- 開花時期をずらし、非GMナタネの播種前に出現した自生ナタネを駆除するため、非GMナタネの1か月前にGMナタネを播種すること(シミュレーション8、9)。ただし、GMナタネの播種日を早める効果は不良な気象条件(たとえば、播種期の雨不足によって発芽が遅れるなど)によって大きく減殺されるかもしれないため、この対策は実用的ではない。

モデルにより、混入率を0.1%未満に下げたための最適な活動が明らかになった。

- 輪作中の休閑期の管理を変えて、春作物を播種すること(シミュレーション13)；
- 提案された変更のいくつかを組み合わせること(シミュレーション14)；
- 圃場の配置を集団化すること(シミュレーション16と17)。もちろん、これはいつでも可能なわけではない；
- 種子生産圃場の周囲300mの範囲内ではナタネ栽培を含まない輪作を導入すること(シミュレーション18)。これには農家間のよい協力関係(と、おそらく契約)が必要である。植物科学委員会は2001年3月13日の意見書²⁰⁾で、他家受粉を最小にするため、種子生産の年にはハイブリッド種子から600m以上の隔離距離をとることを勧めていることに注意する必要がある；
- GMナタネの割合が10%の場合は、開花時期をずらし、非GMナタネの播種前に出現した自生ナタネを駆除するため非GMナタネの1か月前にGMナタネを播種すること(シミュレーション8)。けれ

20) 植物科学委員会の2001年3月13日の意見書は、http://europa.eu.int/comm/food/fs/sc/sep/out_93_gmo_en.pdf で読むことができる。

ども、上で述べた理由からこの対策は実用的とはいえない。

集団化した圃場配置の中に種子生産圃場をもつことは、混入の可能性を小さくするために有効であるが、農家と農業景観の特徴(地区によって異なる)によって効果は異なる。要約すると、もっとも実施しやすいと考えられる対策は、輪作中に春作物を追加導入すること(基準値が0.3%の場合)、あるいは休閑地に被覆植物を春まきすること(基準値が0.1%の場合)である。どちらの場合も自生ナタネが抑えられる。これらの対策の効果は、地区内のすべての農家が農業活動を変更するという(ほかの対策とは異なった)前提に基づいている。だが、休閑地への播種については、認証種子生産圃場だけに適用した場合でも有効と思われる。とくに圃場の配置が分散している場合には、これがもっとも効果的に混入を減らすことのできる方法である。

3.1.9 農家2: 有機栽培による認証種子の生産

農家2は、種子作物の管理が異なる有機栽培農家であること以外は、農家1と同一である(表6)。有機栽培農家ではマメ科植物を含む輪作が行われるので、農家2の輪作にそれらの春作物を導入した。

- ・ R/WW/SC/SA/WW/SC
- ・ SC/WW/SC/SA/WW

R = ナタネ; SA = 休閑; SC = 春作物; WW = 冬小麦
地区内の周辺の農家は一般栽培農家で、農家1と同様な輪作と作物管理を行っている。さまざまなシミュレーションに必要なナタネ全体の割合とGMナタネの割合とを得るため、輪作を地区内に無作為に配置した。境界部は国や自治体の行政組織あるいは請負業者が管理しており、有機的管理が行われている圃場に隣接していても、除草剤が使われることがある。この研究で定めた現在の活動では、境界部での刈取りはしない。

表6 農家2における現在の作物管理

作物	刈り株の破砕	土壌耕起	播種日	播種密度(種子/m ²)	刈取り	機械的雑草防除(播種期)	収穫時口ス
						自生植物枯死率	
非GMナタネ	あり	ブラウ	8/30	70			5%
採種用ナタネ	あり	ブラウ	8/30	70			5%
冬小麦	あり	ブラウ	10/3	350		40%	
春作物	あり	ブラウ	3/1	350		40%	
休閑地					4月中旬		

表7に示すように、有機栽培の農家2における混入レベルは概して一般栽培の農家1より高い。冬小麦での自生ナタネ防除の効率(機械的防除のみで、効率を40%と想定)が低いことがその理由と考えられる。農家内では

GM作物は栽培されておらず、また種子生産のための専用の設備を持っているため、収穫後の混入は非常に少ない。現在の活動のままでは、農家2では、0.3%および0.1%の基準値はどちらも満たせないと思われる。

表7 農家2における現在の農業活動で予想される混入率

農家2	農家内/農家外でのGMナタネの割合	
	0%/10%	0%/50%
	現在の活動	
圃場内での混入(%) ⁽¹⁾	0.4	0.6
他の経路からの混入(%) ⁽²⁾	0.01	0.01
予想される合計混入(%)	0.41	0.61

(1): シミュレーション1(表8)による結果
(2): 条播、耕作機械、収穫、圃場から農家への輸送、貯蔵と清掃、農家からの輸送など。

3.1.9.1 GENESYS による農家2のシミュレーション

栽培体系の要素の変更は、いずれもその農家の圃場だけに関係するものになるだろう。これは、農家外でも変更が実施される農家1の場合とは対照的である。農家外での唯一の変更は、ナタネの収穫時損失に関するものだが、作物管理ではなく気候条件に関係していることが多い。有機農家は、認証種子生産の基準に基づいて、自

分の種子生産圃場と地区内の他のナタネ圃場との間に、300m以上の隔離距離を維持できたと仮定する。

シミュレーション16から18までは、農家1で使用したものと同一である。

農家1の結果と比較して、有機栽培農家での違いは少ない(表9)。

表8 農家2の栽培技術についての変更案の説明(GENESYSモデルでシミュレート、分散圃場配置)

	輪作	作物管理							
		機械的 雑草防除 の効率 W	土壌耕起		非GM ナタネ 播種日	境界部		休閒 播種	GM ナタネの 収穫ロス
			W+Sc	R		刈取り	除草剤		
1	RWScSaWSc	0.40	プラウ	プラウ	8/30	なし	なし	なし	5%
2	RWScSaWSc	0.20	プラウ	プラウ	8/30	なし	なし	なし	5%
3	RWScSaWSc	0.60	プラウ	プラウ	8/30	なし	なし	なし	5%
4	RWScSaWSc	0.40	チゼル	チゼル	8/30	なし	なし	なし	10%
5	RWScSaWSc	0.40	チゼル	プラウ	8/30	なし	なし	なし	5%
8/9	RWScSaWSc	0.40	チゼル	チゼル	9/14	なし	なし	なし	5%
10	RWScSaWSc	0.40	チゼル	チゼル	8/30	4月中旬	なし	なし	5%
11	RWScSaWSc	0.40	チゼル	チゼル	8/30	5月中旬	なし	なし	5%
12	RWScSaWSc	0.40	チゼル	チゼル	8/30	なし	選択性	なし	5%
13	RWScSaWSc	0.40	チゼル	チゼル	8/30	なし	なし	春	5%
14	RWScSaWSc	0.60	チゼル	プラウ	9/14	5月中旬	なし	春	5%
15	RWWSaWScSc	0.40	チゼル	チゼル	8/30	なし	なし	なし	5%

R = ナタネ W = 小麦 Sa = 休閒 Sc = 春作物
注：太字は変更を示す

表9 農家2における有機栽培ナタネ種子生産での推定混入率

農家2	非GMナタネ種子生産におけるGM種子(%) [*] 種子生産圃場	
	農家内/農家外のGMナタネの割合	
シミュレーション	0%/10%	0%/50%
1	0.40	0.6
2	0.42	0.59
3	0.42	0.58
4	0.54	0.71
5	0.18	0.31
6	0.13	0.17
7	0.13	0.17
10	0.41	0.46
11	0.46	0.47
12	4.42	4.9
13	0.02	0.034
14	0.01	0.014
15	2.9	2.9
16	<0.01	<0.01
17	<0.01	<0.01
18	<0.01	<0.01

^{*} ハイブリッド種子生産について、輪作周期の13年めの値を示す

シミュレーション2、3：自生ナタネの防除効率の変更は、農家1でシミュレートされたよりも効率を大きく変えているにもかかわらず、非GMナタネ種子生産への混入率の変化にはつながらない。もっとも、有機栽培農家での自生ナタネの防除は、幼植物の時期に実施されており、自生ナタネの成熟個体数を減らすのに十分な数を殺していないため、その効果はあまり高くない。

シミュレーション5：ナタネ以外の作物を栽培する前にチゼル耕を行うことは、農家2の非GMナタネ収穫物への混入率の抑制に効果がある。これは、チゼルが一般的な耕作方法であった農家1とは対照的に、有機栽培の農家2では、ナタネ栽培の前につねにプラウ耕が行われているためである。

シミュレーション15：輪作の周期を長くすると、農家1の場合とは逆に、ハイブリッド種子生産圃場での混入率が高まる。この結果は意外であるが、この農家内の輪作だけが延長され、他の農家の圃場の輪作はもとのままに維持されたということから説明できる。種子生産の前年に、その生産圃場がGMナタネと隣り合っているという好ましくない状況が生じ、それが、種子生産圃場の

GM 種子バンクの増加をもたらしたのである。

シミュレーション15と18の結果から、種子生産を行わない年でも種子生産圃場を隔離することが、混入レベルを左右する重要な条件であることが明らかである。

3.1.9.2 農家2 についての結論

農家2 の特性を持つ有機栽培農家では、0.3%の基準値は、次の対策を実施することによって達成できるだろう。

- 地区内に10%の GM ナタネがある場合には、ナタネ以外の作物を栽培する前にプラウ耕ではなくチゼル耕をすること(シミュレーション5)。ただし、気候条件によっては、この対策を採用できない場合もあることに注意が必要である。
- 輪作の休閑期の管理を変更して、春作物を播種すること(シミュレーション13)。
- GM ナタネより後に非 GM ナタネを播種すること(シミュレーション8、9)。前にも述べたように、気象条件が開花期間を大きく左右し、GM 品種と非 GM 品種の間に予定していた開花期のずれが小さくなってしまふことがある。GM ナタネを8月中旬に播種をすると、乾燥条件(地区によって異なる)で播種することになって、発芽が困難になるかもしれ

ない。したがって、この方法は他家受粉を抑える手段としては信頼性がたりない。

0.1%未満の混入レベルを達成するためには、有機栽培農家への効果が小さいGM ナタネの早期播種を除いて、農家1 で明らかになったのと同じ農業活動が有効と思われる。

3.1.10 農家2 ' : 小規模有機栽培による有機認証種子の生産

欧州の複数の地域における有機農法の実情をよりよく反映するとともに、農家規模と圃場サイズの影響についての情報を得るため、小規模有機栽培農家(農家2 ')も検討の対象とした。この農家の面積は、農家1 と農家2 の10%しかなく、圃場は1 ha だけである。計算に用いたシミュレーションと作物管理は、どちらも農家2 と同一である。農家の圃場配置は、異なった農家特性(図4、5)に従って変更される。集団化した圃場配置についてのシミュレーション(16、17)については、農家が小さいため、他農家圃場に隣接する種子生産圃場配置だけが可能であった(図5)。したがって、シミュレーション16だけを計算した。

表10 農家2 ' における現在の農業活動で予想される混入率

農家2 '	農家内/農家外でのGMナタネの割合	
	0%/10%	0%/50%
	現在の活動	
圃場内での混入(%) ⁽¹⁾	2.0	9.0
他の経路からの混入(%) ⁽²⁾	0.01	0.01
予想される合計混入(%)	2.01	9.01

(1) シミュレーション1 (表11) からの結果
 (2) 播種、耕作機械、収穫、圃場から農家への輸送、貯蔵と清掃、農家からの輸送など。

現在の活動(表10)のままでは、予想される混入の程度は、農家2 よりも非常に高い。圃場サイズの違いは、GM 作物とGM 自生ナタネからの花粉流動と種子拡散による混入に大きく影響する。検討した2つの基準値のどちらについても、この農家は達成できないだろう。

シミュレーションの結果を表11に示す。

シミュレーション10、11: 境界部の刈取り管理は、種子生産圃場における混入を増加させる。農家2 ' では境界部の数と面積が農家2 と比べて非常に小さい。こうした条件下では、種子生産圃場も境界部の近くに設定せざる

をえない。境界部の反対側で種子生産圃場に隣り合っている圃場では、6年ごとに非GM ナタネが栽培される。種子生産圃場の他の側の圃場は、GM ナタネを6年ごとに栽培している。このような特別な条件では、境界部の刈取り管理は、GM 圃場からのGM 花粉とGM 種子の影響を弱めるために役立っている非GM 自生ナタネの個体数を減らすことになる。GMO の割合が50%の状況においては、境界部の多くがGM 自生ナタネで汚染されているため、境界部の刈取りは混入レベルの低下につながる。

図4 コンピュータ・モデルで検討した農家2'の周辺地区の地図
(左:分散した圃場配置、右:境界の配置)

図5 農家2'の集団化した圃場配置

シミュレーション15、16: どちらの場合も、ランダムな輪作と作付が、予想外の混入の増加をもたらす。種子生産の年に、種子生産圃場の近くに休閒圃場が位置していたためである。この結果も、全期間にわたる種子生産圃場の隔離が重要であることを示している。地区内のGMOの割合が50%の場合は、種子生産圃場の近くに非GM作物圃場が少数あるだけで有益な効果がある。混入率の相当の減少が見られるシミュレーションは、13、14および18のみである。

3.1.10.1 農家2'についての結論

農家2'で現在の活動を続ける場合、圃場での混入レベルは、大規模な有機栽培農家タイプと比較すると非常に高くなる。自生ナタネの防除と他家受粉の問題が大きいため、おそらく、この農家は認証種子生産者としての契約ができず、また、このような高レベルの混入がある種子は受入れも認証もされないだろう。けれども、この農家タイプは、混入レベルに対する農家規模と圃場サイズの影響を適切に表しているのである。

表11 農家2'における有機栽培ナタネ種子生産での推定混入率

農家2'	非GMナタネ種子生産におけるGM種子(%) [*] 種子生産圃場	
	農家内/農家外のGMナタネの割合	
シミュレーション	0%/10%	0%/50%
1	2.0	9.0
2	2.2	9.4
3	2.2	9.4
4	2.0	11.1
5	0.9	6.4
8	0.7	2.7
9	0.7	2.7
10	2.4	7.5
11	3.2	3.4
12	15.0	18.5
13	0.1	0.33
14	0.05	0.23
15	9.2	10.6
16	4.3	7.6
18	<0.01	<0.01

^{*} ハイブリッド種子生産について、輪作周期の13年めの値を示す。

地区内の GMO が10%の場合を考えると、休閑地への春季の被覆植物播種(シミュレーション13)によって、混入レベルを0.3%未満に下げることが可能であろう。GMO の割合が50%の場合、この対策だけでは不十分と思われる。休閑地への春季の被覆植物播種、冬小麦での自生ナタネ防除効率の向上、境界部の刈取り、非 GM ナタネの遅い播種、ナタネ以外の作物の前のチゼル耕の組合せによって、混入のレベルは0.3%を超えない程度にまで低下する。

各対策を組み合わせると、この地区で栽培されるナタネの10%が GMO の場合、0.1%未満の混入レベルに下げることができる(シミュレーション14)。非常に効果的な対策は、輪作の全体を通じて、すべてのナタネ圃場との間に300m以上の距離を保つことであろう(シミュレーション18)。

3.1.11 農家3：一般栽培による農家保存種子の生産

農家3は、大きな圃場区画をもった、かなり大規模な農家である。農家面積の約20%で同時にナタネが栽培される。

表12 農家3における現在の作物管理

作物	刈り株の破碎	土壌耕起	播種日	播種密度(種子/m ²)	種子の入手元	刈取り	除草剤(播種期+春季)		収穫時口ス
							タイプ	自生植物枯死率	
境界部						なし			
GMナタネ	あり	チゼル	8/30	70	市販		選択性	95%	5%
非GMナタネ	あり	チゼル	8/30	70	農家				5%
冬小麦	あり	チゼル	10/3	350			非選択性	95%	
春作物	あり	チゼル	3/1	350			非選択性	95%	
休閑地						4月中旬			

農家1とは異なり、輪作は非常に短く単純で、ナタネと冬小麦だけで構成されている。下に示す2つめの輪作が残りの圃場で行われている。どちらの輪作も、さまざまなシミュレーションに必要な全体的なナタネの割合とGM ナタネの割合が得られるように、地区内に無作為に配置する。

- ・ R/WW/WW
- ・ SC/SA/WW/WW/SC/WW/WW

R = ナタネ; SA = 休閑; SC = 春作物; WW = 冬小麦

農家保存種子は、農家内および農家外の非 GM ナタネ栽培に使われる。作物の管理を表12に詳述する。

導入遺伝子がグリホサート耐性をコードしていると、グリホサートは非 GM 自生ナタネのみを枯らす選択性の除草剤になる。非選択性の除草剤とは、GM 自生植物と非 GM 自生植物を区別なく枯らす活性物質である。

図6 コンピュータ・モデルで検討した農家3の周辺地区の地図

自生植物の枯死率は感受性の自生植物だけに適用される。

農家3の圃場配置を図6に示す。

現在の農業活動で推定される混入率を表13に示す。農家3での圃場内での混入は、農家保存種子を使っているにもかかわらず、農家1と比較するとかなり少ない。その理由は、圃場区画が10~12haと大きいことである。圃場サイズの効果は、農家2と農家2'についても同様であろう。さらに農家3では輪作システムが異なっている。わずか3年の非常に短い輪作であるが、休閑期がない。逆にGM作物を栽培する近隣農家との機械の共有、請負業者の利用、専用でない貯蔵施設などが原因となって、播種、耕作、収穫、収穫後の作業での作物の取扱いによる、かなり高い混入(0.5%)が生じる。圃場以外での混入の影響は、関係研究所の各専門家によって推定されたことに注意が必要である。これらはシミュレーションの結果ではない。

農家3では作物の取扱いが混入の最大の可能性をもたらしている。この可能性を低下させるためには、いくつ

かの対策が可能である。

- 貯蔵施設に投資し、GM作物と非GM作物のための別のサイロを設計すること
- 農家の持つコンバインだけを使用すること
- 輸送車両を念入りに掃除すること
- 近隣の農家との種子の交換をやめること

貯蔵施設への投資以外の方法として、収穫物を直接、集荷・貯蔵組合(CSO)に渡し、農家保存種子を既存の倉庫に貯蔵することも考えられる。しかし、この方法は、もっとも近い協同組合からの距離(地域と国によって異なる)と、その農家の生産物販売戦略によっては、必ずしも実行可能ではないだろう。

他の提案は、おもに農家内での変更を意味する。耕作機械の共有を制限することは(投資費用のため)困難である。だが、コンバインを掃除することは難しくても、十分に行わなければならない。また、一般的に、機械を掃除する時間をもっととるべきである。収穫時の外部の会社の利用は、ほとんど抑制不可能な重要な混入要因となる。

表13 農家3における現在の農業活動で予測される混入率

農家3	農家内/農家外のGMナタネの割合			
	0%/10%	10%/10%	0%/50%	50%/50%
	現在の活動			
圃場内での混入(%) [*] (変動)	0.002 (0.0017-0.003)	0.004 (0.003-0.005)	0.05 (0.04-0.07)	0.09 (0.06-0.12)
他の経路からの混入(%) ¹⁾	0.5	0.5	0.5	0.5
予想される合計混入(%)	0.502	0.504	0.55	0.59

^{*} 圃場内での混入についての値は、輪作周期の2回め(4~6年め)の平均を示した。変動をカッコ内に示した。シミュレーション1(表14)による結果。
(1)条播、耕作機械、収穫、圃場から農家への輸送、貯蔵と清掃など。

表14に、農家3についてのさまざまなシミュレーションの計算結果を示している。混入が生じそうな主要な経路は農家における収穫物の取扱いであり、圃場での混入を低減するための作業の変更はそれほど重要ではない。それでも、その結果は興味深い情報をいくつか提供している(表15)。

シミュレーション16: 圃場を分散した配置から集団化した配置に変更する。種子生産圃場は、集団の端にあり、農家外の圃場に隣接している。

農家1と比較すると、次のような違いが注目される:
シミュレーション2、3: 除草剤の効果の違いが農家内での混入レベルに及ぼす影響は、農家1の場合よりも大

きい。その理由は、農家3の自生ナタネの量が少ないためである。この場合、枯死率の違いは、除草剤の効果がほとんどないほど自生ナタネの量が多かった農家1よりも顕著である。

シミュレーション4: 農家外でのGMナタネの収穫ロスの増加は、非GMナタネ作物に影響を与えなかった。圃場が大きいために、非GM作物は外部からの花粉と種子の流入から、よく保護されている。

シミュレーション5: ナタネ作付け前のブラウ耕起は、混入率を減少させなかった。種子バンクが小さいため、土壌耕起の効果はあまりない。

表14 農家3の栽培技術についての変更案の説明 (GENESYS モデルでシミュレート、分散圃場配置)

	輪作	作物管理									
		非GM ナタネ 種子の 入手元	除草剤 自生植物 枯死率 W	土壌耕起		播種日		境界		休 閑	GM ナタネ の収穫 ロス
				W+Sc	R	GM ナタネ	非GM ナタネ	刈取り	除草剤		
1	RWW	農家	0.95	チゼル	チゼル	8 / 30	8 / 30	なし	なし	なし	5 %
2	RWW	農家	0.8	チゼル	チゼル	8 / 30	8 / 30	なし	なし	なし	5 %
3	RWW	農家	0.99	チゼル	チゼル	8 / 30	8 / 30	なし	なし	なし	5 %
4	RWW	農家	0.95	チゼル	チゼル	8 / 30	8 / 30	なし	なし	なし	10%
5	RWW	農家	0.95	チゼル	ブラウ	8 / 30	8 / 30	なし	なし	なし	5 %
8	RWW	農家	0.95	チゼル	チゼル	8 / 15	9 / 14	なし	なし	なし	5 %
10	RWW	農家	0.95	チゼル	チゼル	8 / 30	8 / 30	4月中旬	なし	なし	5 %
11	RWW	農家	0.95	チゼル	チゼル	8 / 30	8 / 30	5月中旬	なし	なし	5 %
12	RWW	農家	0.95	チゼル	チゼル	8 / 30	8 / 30	なし	選択性	なし	5 %
13	RWW	農家	0.95	チゼル	チゼル	8 / 30	8 / 30	なし	なし	春	5 %
14	RWW	農家	0.99	チゼル	ブラウ	8 / 15	9 / 14	5月中旬	なし	春	5 %
19	RWW	市販	0.95	チゼル	チゼル	8 / 30	8 / 30	なし	なし	なし	5 %
20	RWWSaWSc	農家	0.95	チゼル	チゼル	8 / 30	8 / 30	なし	なし	なし	5 %

R = ナタネ, W = 小麦, Sa = 休閑, Sc = 春作物
注: 太字は変更を示す

表15 農家3における食用・飼料用ナタネ生産での推定混入率

農家3	非GMナタネ生産におけるGM種子 (%) *			
	農家内/農家外でのGMナタネの割合			
シミュレーション	0 % /10%	10% /10%	0 % /50%	50% /50%
1	0.002	0.004	0.05	0.09
2	0.003	0.0046	0.056	0.1
3	0.0024	0.004	0.055	0.09
4	0.0025	0.004	0.063	0.11
5	0.0024	0.0026	0.055	0.09
8	0.0014	0.0028	0.041	0.04
10	0.0015	0.0027	0.053	0.07
11	0.0015	0.15	0.052	0.05
12	0.13	0.004	0.25	0.34
13	0.0023	0.0024	0.054	0.09
14	0.002	0.04	0.04	0.03
16	0.001	0.04	0.008	0.22
19	0.0004	0.0006	0.006	0.01
20	0.1	0.02	1.3	3.0

* 圃場内の混入の値は、2回めの輪作周期 (4年めから6年め) の平均値を示す。

シミュレーション8 : 同様に、播種の日付を変えることは、農家1の場合より影響がはるかに小さい。種子バンクが小さいため、非GM作物の播種を遅らせても、自

生ナタネの生存にはほとんど影響しない。さらに、圃場が大きいために、開花期間の重複を減らすことによる花粉の流動への影響も小さい。

シミュレーション10、11 : 境界部の刈取りは、農家3ではより効果的である。圃場が大きいため、ナタネ作物は農家1のときよりも集中している。そのため、境界部は遺伝子拡散に重要な役割を果たし、それらの管理は重要である。農家1では、圃場が小さかったため、ナタネ作物は、地区全体に一樣に分布していた。

シミュレーション12 : グリホサートの散布は、GM自生植物に選択的な優位を与え、混入率を高める。この影響は、GM自生植物の比率が高いとき (農家内と農家外に10%のGM作物がある場合) には小さくなる。

シミュレーション13 : 輪作体系が異なるため、休閑地の管理は農家1よりも重要ではない。農家3におけるナタネ輪作体系は休閑をまったく含まないため、休閑畑での種子生産を防止することは、遺伝子流動に関して農家1ほど重要ではない。農家3で見られる混入率の減少は、もっぱら、隣接する休閑圃場からその時期の非GM圃場への花粉流動が減少したことによるものである。

シミュレーション16 : 農家3における圃場の集団化は、

圃場が農家1よりも大きいため、効果は小さい。この状況は、農家内のGM作物の割合が高くなると変化する。その場合は、圃場を集団化すると、農家内での混入がかなり増加する。

シミュレーション19: 農家保存種子に代えて市販種子（混入がないと仮定する）を使うと、混入率はかなり低下する。ただし、混入のレベルがすでにかなり低いため、この状況での重要性は低い。

シミュレーション20: ナタネ輪作の中に休閑期を導入すると、輪作周期を延長して、ナタネ作物を3年ごとではなく6年ごとに栽培したとしても、混入を増やすことになりそうである。農家内および農家外のGM作物の割合が10%の場合は、休閑地の導入の影響は小さく、他の混入経路のほうが、より重要である。GM作物の割合が農家内と農家外で50%のときは、予想される混入率は、もっと高い。その圃場でナタネが栽培されない期間の種子バンクが、休閑の間に更新されることになる。GM作物の割合が高いため、この更新では、GM種子の増加がGM作物が10%のときよりも増幅される。GM作物が10%の場合は、休閑期には非GM種子の更新も行われ、GM混入を薄める働きがある。

3.1.11.1 農家3についての結論

農家3では、栽培時と収穫後のナタネの取扱いが混入率に影響する重要な要因である。0.3%の基準値は、専用の機械への投資、あるいは非GMナタネに使用する機械の徹底的な掃除によって、作物の取扱いを変更することで達成できる。この変更によって、収穫後の混入水準は0.5%程度から0.14%程度にまで抑えられる。

農家と地区のGMナタネ割合が50%の場合には、圃場内での混入を減らす追加の対策がとれる。複数の対策の組合せ（シミュレーション14）が有効であり、また保存種子の使用をあきらめて市販種子（シミュレーションでは混入がまったくないと仮定）を使うことも有効である（シミュレーション19）。後者の対策では、農家3は食品と飼料の生産に完全に切り替えられた状態になり、種子生産の基準値である0.3%はもはや適用されず、1%の基準値がかわりに適用されるであろう。

0.1%の基準値は達成できない。専用の貯蔵設備に投資することも、混入の可能性をいっそう減少させるが、これは非常に高くつき、結局は農家全体の戦略を変更せざるをえないだろう。その上、混入のある農家保存種子を使用するので、圃場内混入率が時間とともに増大する。農業経営を変更しても、基準値に到達する時期が遅くなるだけである。これらの結果は種子純度の重要性を強く示している。

3.1.12 農家4：有機栽培による農家保存種子の生産

農家4は農家3に対応する有機栽培農家で、有機栽培の農家2と同じ輪作体系を持つ以外は農家3と同じ特徴を持っている。周辺の一般栽培農家では、一般栽培の農家3と同じ輪作を実施している。すべての農家は非GMナタネ生産用に農家保存種子を使う。農業活動の変更は有機栽培農家4にのみ適用される。農家外での変更は収穫ロスに関係するものだけである。

現在の農業活動を実施した場合に予想される混入率を表16に示す。

表16 農家4における現在の農業活動で予想される混入率

農家4	農家内/農家外のGMナタネの割合	
	0%/10%	0%/50%
	現在の活動	
圃場内での混入(%)*(変動)	0.2 (0.009 0.6)	1.0 (0.58 1.43)
他の経路からの混入(%) ⁽¹⁾	0.09	0.09
予想される合計混入(%)	0.29	1.09
* 圃場内での混入についての値は、輪作周期の2回め(7~13年め)の平均を示した。変動をかつこ内に示した。シミュレーション1(表17)からの結果。 (1) 条播、耕作機械、収穫、圃場から農家への輸送、貯蔵と清掃など。		

農家4は、対応する一般栽培農家と比較して、圃場内の混入レベルがはるかに高い。農家4では、農家3が休閑のない非常に短い輪作だけを実施していたのとは異なり、休閑期のある輪作体系を使用しているため、圃場内

での混入が大きい。その上、雑草の防除の効果が小さい。収穫後の取扱いによる混入が、GMナタネ栽培農家とコンバインを共有することによって生じる。現在の農業活動のままでは0.3%の基準値は達成できない。同様な管

理を実施している農家2と比較すると、混入率は低い。これは、圃場サイズが大きいため、非GMナタネがGMナタネの花粉と種子の流入から効果的に保護されているためである。農家4では農家2のときと同一のシミュレーションについて計算した。結果は表17に示す。

表17 農家4における食用・飼料用有機栽培ナタネ生産での推定混入率

シミュレーション	農家4 非GMナタネ種子生産におけるGM種子(%)*	
	農家内/農家外のGMナタネの割合	
	0%/10%	0%/50%
1	0.20	1.0
2	0.21	1.0
3	0.21	1.0
4	0.21	1.34
5	0.22	0.9
8/9	0.06	0.3
10	0.18	0.9
11	<0.01	0.36
12	1.26	2.5
13	0.03	0.06
14	<0.01	0.02
16	<0.01	0.02
19	0.09	0.23

* 圃場内の混入の値は、2回目の輪作周期(7年めから13年め)の平均値を示す。

農家3と比較すると、農家4のGM種子バンクは大きく、かなり重要な混入源がつねに存在していることになるため、農家保存種子の代わりに市販種子を使用しても効果は小さい。その上、市販種子は農家4だけが使用し、周辺の農家は農家保存種子を使い続けている。

3.1.12.1 農家4についての結論

まず、収穫時の作業での混入の削減を実行する必要がある。これは他の農家との機械の共有をやめることによって行える。収穫後の混入率を0.09%から0.05%に削減できる。

地区のGM作物が10%の場合、混入レベルを0.3%未満に抑えるためには、春に休閑地への被覆植物の播種を行うことが効果的である(シミュレーション13)。別の効果的な対策は、非GMナタネより早い時期にGMナタネを播種し、開花期間の重なりを小さくすることである(シミュレーション8、9)。ただし、この対策を使用できるかどうかは気象条件に依存し、年によって異なる。したがって、この対策は他家受粉を最小限に抑える確実な方法とはいえない。また、市販種子を使用するこ

ともひとつの選択である(シミュレーション19)。地区のGM作物の割合が50%の場合は、休閑地への春季の被覆植物播種(シミュレーション13)あるいは複数の対策の組み合わせ(シミュレーション14)によって、0.3%未満の混入率が達成できるだろう。

地区のGM作物が10%の場合、境界部の草刈りは混入レベルを0.1%未満に抑える有効な手段である(シミュレーション11)。だが、この対策が十分な効果を生むかどうかは近隣の農家の協力と管理に依存している。自生ナタネを減少させる複数の対策の組合せ(シミュレーション14)も混入レベルを0.1%未満に抑えるために使用できる。農家の圃場を集団化することもプラスの効果を示した(シミュレーション16)。

3.1.13 農業活動の変更のための諸費用

農業活動の変更によって生じる新たな諸費用を以下のように推定した。効果的な対策のいくつかについては農地の再編成が必要であったり(圃場の集団化、シミュレーション16と17)あるいは使用する作物と輪作体系の全面的な変更(輪作周期全期間での300mの隔離距離、シミュレーション18)を含む農家間の協力が必要であったりするため、費用を推定できなかった。

- ・ナタネ以外を栽培する前にチゼル耕を行うこと(農家2、シミュレーション5)

チゼル耕はプラウ耕より安上がりなので(チゼル耕は44.5ユーロ/ha、プラウ耕は80.5ユーロ/ha)、新たな費用はないと仮定する。

- ・GMナタネと非GMナタネの播種期を変更すること(シミュレーション8と9)

作業手順は増えないので、新たな費用はないとする。

- ・境界部の管理(シミュレーション10と11)

- 仮定:
- 境界部の管理は農家が実施し、
 - 40~60馬力のトラクターと2m幅の草刈り機を使用して、30~100haの刈払いを年に1回、実施し、
 - 通路や道路の両側の幅は1mと見なす。

費用の推定額については表18を参照。

農家4については通路と道路を2.34haと推定し、これを外挿して全面積633haに対応する面積を4.2haとした。農家4が栽培する70haのナタネへの混入を最小限に抑えるためにこの4.2haの境界部を刈り払うとすると、新たな費用は4.3ユーロ/ナタネhaとなる。これは農家4の売上総利益に有機ナタネで得られる助成金を加えた額の0.5%に相当する。

表18 境界管理のための費用の推定
(Teyssier 1999²¹⁾のデータから計算)

	費用 (EUR/ha)
トラクター	7 - 9.14
草刈機	9.9 - 25
人力	45.73
合計費用	62.63 - 79.87
平均合計費用	71.25

- ・ 休閑地への春季の播種 (シミュレーション13)
 - 仮定：
 - 休閑地にイタリアンライグラスあるいはハイブリッドクローバを播種
 - 機械作業は2回の収穫後耕起 (stubble cultivation) 播種、鎮圧、1回 (最小の管理) または2回 (最大の管理) の刈払い
 - 種子の費用は播種密度に関する ITCF の勧告 (ITCF, 1994) に従って計算
 - 運営費には機械整備、燃料および機械油を含む
 - 機械費には新しい機械 (Gembloux 法) の償却費を含む

表19 休閑地へのハイブリッド・クローバまたはイタリアン・ライグラスの播種費用の推定
(Perspectives agricoles 誌、1994年7/8月号より)

	ハイブリッド・クローバ	イタリアン・ライグラス
種子 (EUR/ha)	25.9 - 34.68	34.5 - 46
運営費 (EUR/ha)	45.73	45.73
機械費 (EUR/ha)	99.8 ⁽¹⁾ - 136.74 ⁽²⁾	99.8 ⁽¹⁾ - 145.27 ⁽³⁾
合計費用 (EUR/ha)	171.43 - 217.15	180 - 237
(1) 破砕1回を含む最小限管理		
(2) 破砕2回を含む最大限管理		
(3) 最大限管理 + 窒素肥料の施用		

- ・ 対策の組合せ (シミュレーション14)

複数の対策の組合せの中で、対策のひとつ (除草効率の強化) については、混入レベルの低減効果がまっただけでなかったため、この費用計算から除外した。非GM ナタネの播種を遅らすことと、ナタネ以外を栽培する前にチゼル耕を行うことについては、追加の費用

- ライグラスに窒素肥料を施用する

追加費用の計算にはハイブリッドクローバ播種の平均費用 (194.3ユーロ/ha) を使用した。この金額は、農家1と農家2ではナタネの売上総利益に助成金を加えたものの20%に相当し、農家4では24%に相当する。費用は選択した管理強度 (刈払いの回数、施肥の有無) によって異なる。この研究で使用した農家タイプでは休閑地への播種は実施されていない。加盟国の一部では、雑草の問題が深刻になると休閑地のブラウ耕が行われることに注意が必要である。この場合は、休閑地にハイブリッドクローバまたはイタリアンライグラスを播種する費用は、種子購入と播種、施肥の費用だけに縮小することができる。ここに示した混入レベルは、農家内 (有機栽培農家) あるいは地区内 (一般栽培農家) で、すべてのナタネ圃場の休閑地に播種した場合のものである。けれども、シミュレーションの結果、対象とする種子生産圃場 (農家1、農家2、農家2') の休閑地だけに播種しても、効果は同じであることが示された。そのため、費用の計算は、対象とする圃場の休閑地への播種についてだけ行った。

は生じないと仮定した。費用が必要な対策は、休閑地への春季の被覆植物播種 (194.3ユーロ/ha) と、境界部の草刈り (上を参照、農場4で4.3ユーロ/ha、農家2'で6.2ユーロ/ha) である。農家4での追加費用は合計198.6ユーロ/ha (売上総利益プラス助成金の27%)、農家2'での追加費用は200.5ユーロ/ha (売

21) Teyssier, Daniel 1998-1999. Index des prix et des Normes agricoles (14^{ème} édition). (価格・農業基準目録 第14版) Synthèse agricole, Bordeaux.

上総利益プラス助成金の20%)となる。

・輪作中への春作物の追加(シミュレーション15)

追加の費用はないと仮定する。春作物を新たに追加して輪作を長くすることで短期の収益性が高まるだろう。その区画が使用されない(休閒の)期間が相対的に短縮されるためである。ただし、長期の影響として(土地生産性の低下を避けるために)肥料の使用量が増加し、環境への悪影響が生じるだろう。

・機械の専用化(農家3)

追加費用のデータは入手できなかった。予想される

追加費用として、現在の機械費からの増加を50%と見積もった。これは追加費用93.2ユーロ/haに相当する。

3.1.14 ナタネについての総合的な結論

表20と表21に、GM作物の存在下でのナタネ種子生産についての結果をまとめている。「最良の活動変更」を、0.3%および0.1%の目標基準値を満たす生産のための、もっとも安上がりな、または適用しやすい農業活動として選択した。

表20 現在の農業活動と推奨する農業活動による一般栽培農家と有機栽培農家のナタネ種子生産における混入率の要約(地区のGMO比率が10%の場合、中期的評価)*

農家のタイプ	一般栽培 1	一般栽培 1 (農家内で GMOを 10%栽培)	有機栽培 2 (大規模)	有機栽培 2',** (小規模)	一般栽培 3	一般栽培 3 (農家内で GMOを 10%栽培)	有機栽培 4 (大規模)
現在の活動 予想される混入率	0.22%	0.22%	0.41%	2.01%	0.5%	0.5%	0.29%
基準値0.3%を満たすための最良の活動への変更 予想される混入率	現在の活動	現在の活動	ナタネ以外の栽培前にチゼル耕 0.19%	休閒地に被覆植物を春季播種 0.11%	専用機械、機械の清掃 0.14%	専用機械、機械の清掃 0.14%	休閒地に被覆植物を春季播種 0.08%
追加費用 (EUR/ha)	0	0	~ 0***	194.3	93.2		194.3
基準値0.1%を満たすための最良の活動への変更 予想される混入率	休閒地に被覆植物を春季播種 ⁽¹⁾ 0.03% ⁽²⁾	休閒地に被覆植物を春季播種 ⁽¹⁾ 0.03% ⁽²⁾	休閒地に被覆植物を春季播種 0.03% ⁽²⁾	活動の組合せ ⁽³⁾ または圃場から300m以内での非ナタネ輪作 0.06% または 0.02%	収穫後管理の全面変更	収穫後管理の全面変更	活動の組合せ ⁽³⁾ または地区内の境界部管理 0.06% または 0.06%
追加費用 (EUR/ha)	194.3	194.3	194.3	200.5 /n.d.	-	-	198.6 /4.3

* 種子バンクには、シミュレーションの開始時に混入がないと仮定した
 ** 有機栽培農家2'は小規模農家で、区画も非常に小さく、典型的な認証種子生産者とはいえない。
 *** 現在の活動と比較して追加の費用はない。
 (1) 調査した地区のすべてに休閒地について(とくに、種子生産農家の圃場配置が分散している場合)
 (2) 圃場の分散配置と集団化配置の両方について。集団化した圃場配置の場合、種子生産畑を「保護された位置」に置く。
 (3) 活動の組合せには、休閒地への春季の被覆植物播種、ナタネ以外の栽培前のチゼル耕、地区全体の境界部管理、播種時期の移動を含む。
 n.d.: 算出していない

表21 現在の農業活動と推奨する農業活動による一般栽培農家と有機栽培農家のナタネ種子生産における混入率の要約 (地区の GMO 比率が50%の場合、中期的評価) *

農家のタイプ	一般栽培 1	一般栽培 1 (農家内で GMOを 50%栽培)	有機栽培 2 (大規模)	有機栽培 2' ** (小規模)	一般栽培 3	一般栽培 3 (農家内で GMOを 50%栽培)	有機栽培 4 (大規模)
現在の活動 予想される混入率	0.42%	0.42%	0.61%	9.01%	0.55%	0.59%	1.09%
基準値0.3%を満たすための最良の活動への変更	輪作中に春作物を追加導入 ⁽³⁾	輪作中に春作物を追加導入 ⁽³⁾	休閑地に被覆作物を春季播種	活動の組合せ ⁽⁴⁾	専用機械、機械の清掃	専用機械、機械の清掃	休閑地に被覆作物を春季播種
予想される混入率	0.19%	0.19%	0.04%	0.23%	0.19%	0.23%	0.11%
追加費用 (EUR/ha)	~ 0 ***	~ 0 ***	194.3	200.5	93.2	93.2	194.3
基準値0.1%を満たすための最良の活動への変更	休閑地に被覆作物を春季播種 ⁽¹⁾	休閑地に被覆作物を春季播種 ⁽¹⁾	休閑地に被覆作物を春季播種	活動の組合せ ⁽³⁾ または圃場から300m以内での非ナタネ輪作	収穫後管理の全面変更	収穫後管理の全面変更	活動の組合せ ⁽³⁾ または地区内の境界部管理
予想される混入率	0.03% ⁽²⁾	0.03% ⁽²⁾	0.04% ⁽²⁾	0.03%			0.07%
追加費用 (EUR/ha)	194.3	194.3	194.3	n.d.	-	-	198.6
<p>* 種子バンクには、シミュレーションの開始時に混入がないと仮定した</p> <p>** 有機栽培農家2'は小規模農家で、区画も非常に小さく、典型的な認証種子生産者とはいえない。</p> <p>*** 現在の活動と比較して追加の費用はない</p> <p>(1) 調査した地区のすべて休閑地について(とくに、種子生産農家の圃場配置が分散している場合)</p> <p>(2) 圃場の分散配置と集団化配置の両方について。集団化した圃場配置の場合、種子生産畑を「保護された位置」に置く</p> <p>(3) 環境面で問題がある(冬季に土壤被覆がないために硝酸塩流出のリスクがある)が、推定は難しい</p> <p>(4) 活動の組合せには、休閑地への春季の被覆植物播種、ナタネ以外の栽培前のチゼル耕、地区全体の境界部管理、播種時期の移動を含む。</p> <p>n.d.: 算出していない</p>							

シミュレーションの結果から、圃場内での混入に影響する重要な要因は以下のとおりと考えられる。

- ・ 種子の純度。農家保存種子の場合、非純粋種子は重要な混入源になる。
- ・ 品種。組合せ品種とハイブリッドの生産では、雄性不稔植物の割合が高いため、自殖性の高い品種よりも他家受粉の影響を受けやすい。
- ・ 自生ナタネの防除。雑草防除の効率は有機栽培農家よりも一般栽培農家で高く、混入率に大きく影響する。
- ・ 輪作/休閑(管理)。使用されている輪作システムの特徴、すなわち休閑年を含むかどうかは、混入にかかわる非常に重要な問題である。休閑中の圃場では自生ナ

タネが生育して花粉と種子が拡散するため、以降の年の種子バンクが増大する。休閑年に春作物を播種すると、この影響を避けることができる。

- ・ 種子生産圃場の十分な隔離。種子生産圃場を輪作の全期間にわたって他のナタネ作物から隔離することが、種子バンクと自生ナタネの問題の拡大を避けるために重要である。
- ・ 景観中における圃場の配置(集団化/分散化)。圃場を集団化すると種子生産圃場周辺の圃場の管理が可能になり、種子生産圃場を保護することができる。この効果は、農家の規模と種子生産区画の厳密な位置に左右される。

圃場内での混入を減らすためのいくつかの対策を、GENESYSを利用して調べた。対象農家での変更だけでは済むような対策は少ない。ほとんどの対策は、少なくとも近隣農家との部分的な協力が必要であるが、これらは概してもっとも効果的な対策である(圃場配置の変更、全期間を通した300mの隔離距離など)。シミュレーションの結果では、調査した農家タイプでは、圃場内での混入をある程度にまで抑制でき、非常に低い混入レベルでの生産も可能かもしれない。認証ハイブリッド種子生産を効果的に分離することについて、植物科学委員会は2001年3月13日²²⁾の意見書で、他家受粉を最小にするためには種子生産年に600m以上の距離が必要であると述べていることに注意が必要である。この勧告はシミュレーションの結果には反映されていない。

農業活動の変更の経済的側面については判断できなかった部分があるが、データを手に入れた事例では、低い混入レベルを達成するためには、かなり高い費用が必要になるかもしれないことが示された。

認証種子生産(農家1、農家2、農家2')では、種子生産のために混入のない原種子を利用し、有効に機能する分別システムを農家内に持っている想定したが、この研究で想定した現在の活動では基準値を下まわる混入率は維持できないであろう。GMナタネの割合が10%の場合の農家1だけは例外で、混入レベルを0.3%未満に抑えられる。混入レベルを十分に0.1%未満に減らそうな対策が、どの農家タイプでも利用できる。もっとも採用しやすい対策は休閑地への春季の播種であろう。これはその農家の判断で行うが、助成金を加えた売上総利益の約20%に相当する。

この結果は、有機栽培農家では自生ナタネの問題が大きいいため、地区内にあるGMナタネの影響を一般栽培農家よりも大きく受けることも示している。有機栽培農家をもっと小規模な場合(農家2')は、この混入の問題はもっと深刻になる。この農家は、まちがいに認証種子生産に不適格とされるだろう。混入を抑えることに役立つのは近隣の一般栽培農家との密接な協力のみであろう。

シミュレーションの結果、地区内のみでGM作物が栽培されている場合と農家内でも栽培されている場合との間では、ほとんど差がないことが示された。ただし、

認証種子生産者は、とにかく混入の可能性を減らすために、農家内でのGMナタネ栽培を避けるに違いない。

一般栽培の農家保存種子の場合(農家3)は、その農家の構造と生産した作物の取扱いが混入のレベルに大きく影響する。混入を最小限にするためには機械の専用化と機械の清掃、あるいは貯蔵施設などへの投資による収穫後作業の再編成が、近隣農家との種子の交換の中止とともに必要となるであろう。予測値が示すように、混入レベルを0.1%未満に減らすことは非常に困難で、不可能に近いだろう。農家4は有機栽培農家であるため、分別に関する問題は小さいが、圃場内での混入レベルは高い。農家保存種子の使用をやめなくても混入レベルを0.1%未満に抑えられるが、やはり費用が高いために実施は難しいかもしれない。

GENESYSで得られたこの結果は、いくつかの仮定に基づいている。すべてのシミュレーションで、輪作の開始時には種子バンクへのGM種子の混入がまったくないと仮定した。この仮定は、一般栽培農家で栽培するナタネの10%あるいは50%がGMナタネであるという、一部のシミュレーション条件と大きく異なっている。これを考慮すると、GMナタネと非GMナタネが同じ農家で栽培されている場合に、非常に低い混入レベルを達成することはほとんどありえないだろう。さらに、これらのシミュレーション結果は中期的な結果である。種子バンクへの混入は、長期のシミュレーションで示したように、時間とともにかなり増大するかもしれない。

以上の結果を要約すると、この研究で検討した農家タイプが、現在の活動のままで0.3%未満の混入レベルを達成することは難しいだろう。圃場内での混入を大きく低下させることによって、0.1%未満のレベルに届く程度にまですることは可能である。収穫物の取扱いと農家の物流に関する問題(農家3)は解決がさらに困難であり、この農家タイプでは0.1%というごく低い混入レベルは達成できないだろう。

22) 植物科学委員会の2001年3月13日の意見書は、http://europa.eu.int/comm/food/fs/sc/scp/out_93_gmo_en.pdf で読むことができる。

3.2 飼料用トウモロコシ子実の生産

3.2.1 作物の生産と利用

栽培トウモロコシ (*Zea mays*) の起源は中央アメリカ原産のテオシント (*Z. mexicana*) であると考えられており、欧州には16世紀に持ち込まれた。トウモロコシは世界中で栽培されており、世界の人口のかなりの部分で主食とされ²³⁾、欧州やその他の国々で家畜飼料用の作物として栽培されている。

トウモロコシは丈の高い一年生のイネ科植物である。茎の先端にある雄穂に機能的な雄花がつき、雌穂は中位の葉の葉腋中につく。花粉はすべて雄花で生産され、雄穂から大量に放出される。1本の植物が、トウモロコシ子実に発育する各胚珠の1個あたり、9,000個から50,000個の花粉粒を放出すると推定されている。花粉粒の放出は、12~14日間にわたることもあるが、より一般的には5~8日のもっと短い期間で放出される。平均的なトウモロコシの雌穂1本におよそ500粒がつくと仮定すると、1本の植物は450万個から2,500万個の花粉粒を産生することになる。花粉粒は大きく(90~125 μ m)、他の風媒植物と比較すると落下速度が大きいため、堆積は相対的に速い。トウモロコシは雄性先熟の種であると考えられているが、同一個体での花粉の放出と絹糸の出現が一部重複することが普通で、最大5%の自家受粉が起こる。

トウモロコシ子実は乾燥種子として生産され、さまざまな家畜飼料や人間の食物に加工される。欧州では、トウモロコシ子実はおもにフランス(170万ha、1999年のEUの生産面積の43%)とイタリア(90万ha、同23%)で生産されている。

GMトウモロコシの栽培面積は、1999年の世界全体のGM総栽培面積の約27%に相当する。これは世界全体のトウモロコシ栽培面積の約8%にあたる。GMトウモロ

コシの多くは米国、アルゼンチンおよびカナダで栽培されている。欧州では、フランスで1998年に2,000haで栽培されたが、1999年には100haだけとなった。スペインとポルトガルでは1999年に小面積で栽培されている(それぞれ10,000~25,000haと1,000ha)²⁴⁾。いままでに栽培されたGMトウモロコシはすべて耐虫性のBtトウモロコシであり、土壌細菌 *Bacillus thuringiensis* からの毒素を産生する。

3.2.2 混入の経路

3.2.2.1 花粉による遺伝子流動

トウモロコシは主として風で授粉する。多くの花粉は畑の周辺5m以内に落下し、花粉の98%が、ほとんどそのトウモロコシ畑内の半径25~50mの中に落ちる²⁵⁾。しかし異系交雑は800mの距離でも検出されている²⁶⁾。GMトウモロコシと非GMトウモロコシの間の花粉飛散と花粉流動は、花粉放出の規模と、放出側と受入れ側の距離とに左右されるようである。また、放出源の方向に沿った受入れ側圃場の奥行きが関係する。この「圃場の奥行き」は、混入の低減に関しては総面積より重要である。連続した列において生じる異系交雑の割合から、その混入源に隣接する最初の5列が混入花粉の飛散に対する障壁の役割をすることが明らかになっている。したがって、境界部に何列かを追加するだけで花粉汚染を軽減できる²⁷⁾。全体として見ると、近接する他のトウモロコシ作物との交雑比率は分離の距離、花粉移動に対する局所的な障壁、地区の気候や地形などの要因に左右される。

GM品種と非GM品種の間に遺伝子移入が生じたとしても、こぼれ種に由来する自生雑草の問題が起きる可能性は低い。自生雑草の繁殖能力が、自然には種子散布ができないなどの特性によって制限されているからであ

23) Anon (1994 b) The Regulatory Directive Dir 94-11 Plant Biotechnology Office, Plant Health and Production Division, Canadian Food Inspection Agency

24) European Commission, DG Agriculture (欧州委員会農業総局) 2000. Economic impacts of genetically modified crops in the agri-food sector (農業 食品部門における遺伝子組換え作物の経済影響). ENDS Daily 09/05/00(www.environmentdaily.com)

25) Sears, M. K. & Stanley-Horn, D. (2000) Impact of Bt corn pollen on monarch butterfly populations (オオカバマダラ個体群に対するBtトウモロコシ花粉の影響), in Fairbairn, C., Scoles, G. & McHughen, A. (Eds.) Proceedings of the 6th International Symposium on The Biosafety of Genetically Modified Organisms. University Entention Press, Canada; Pleasants, J. M., Hellmich, R. L. & Lewis, L. C. (1999) Pollen deposition on milkweed leaves under natural conditions (自然条件下におけるトウワタの葉への花粉堆積) (presentation at the Monarch Butterfly

26) Salamov, A. B. (1940) Sel. I. Sem., 3. (1949年にMichael Afanasievによってロシア語から翻訳).

27) Jones, M. D. & Brooks, J. S. (1952) Effect of tree barriers on outcrossing in corn (トウモロコシの異系交配に対する障壁樹木の効果). Oklahoma Agricultural Experimental Station, Technical Bulletin No. T-45.

る。落下したトウモロコシ種子は休眠性がなく、低温下での生存能力もないため、欧州の気象条件では長い期間は生き残れないだろう²⁸⁾。

トウモロコシが交雑できる類縁種は欧州では知られていない。したがって、GM トウモロコシから野生植物への遺伝子流動、および野生植物からトウモロコシへの逆方向の遺伝子流動の可能性はないと思われる。

3.2.2.2 非意図的な混合

播種、耕作機械類、収穫を通じた混入は少ないと考えられる。種子の混入は、収穫後のトウモロコシ子実の処理、貯蔵、および輸送の際に生じやすい。そのおもな原因は分離のための適切な設備がないことと、不適切な作業や品質管理である。

3.2.2.3 種子の純度

EU における現在の最低分離距離は、種子生産の全カテゴリーについて200mとされている。これは、同型交配系統を99.9%の純度で維持するためには十分であると思われる²⁹⁾。種子の供給元によっては偶然に混入したGM 種子が含まれるかもしれない。混入がもっとも多いと思われるのは、GM 作物が広く栽培されている地区で生産された種子、あるいはGM 品種の種子も生産する業者からの種子である。2000年には北米から輸入された種子ロットに少量のGM 種子が含まれ、加盟国レベルで行われた規制措置で(フランスが)調査したトウモロコシ種子のかなりの割合(41%)で低レベル(0.2%未満)のGMO 混入が見つかった³⁰⁾。現在、欧州での商業的なGM トウモロコシの栽培は、スペイン(トウモロコシ栽培面積の2%~4.3%)と東欧のいくつかの国以外ではほとんど行われていない。したがって、欧州で生産される種子が汚染されることはなさそうである。ただし、GM 作物が広く栽培されるようになれば、この状況は変わるかもしれない。

3.2.3 代表的な農家タイプ

トウモロコシ子実の生産を2つの主要な生産地域であるフランスとイタリアで調査した。異なった栽培法に対

応して2つの農家タイプを設定した。農家1と農家5は南フランスのポー流域(Pau valley)とイタリアのポー平原(Po plain)にそれぞれ位置し、おもに連続栽培でトウモロコシを作り、トウモロコシが主要生産作物である地域(面積の80%までがトウモロコシを連続栽培している)に属している。熟期の遅いハイブリッド品種を栽培し、種子は米国から輸入している。収穫されたトウモロコシ子実は処理センターに運ばれ、選別、乾燥、貯蔵が行われる。農家1に対応する有機栽培農家(農家2と農家2')は長期輪作の中でトウモロコシを作っている。

農家3は一般栽培農家であり、長期輪作の中で、農家面積の20%だけでトウモロコシを栽培している。中央フランスのボース地方(Beauce region)に位置している。圃場規模は大きく(20ha)、他のトウモロコシ圃場までの距離は平均500mである。この農家では早生(early)品種と半早生(semi-early)品種を作っており、センターの連続乾燥機でトウモロコシ子実を乾燥する。農家4と農家4'(より小規模)は、この農家タイプの有機栽培版の農家である。

農家の特性を表22に要約する。

3.2.4 コンピュータ・モデル MAPOD

圃場内での混入レベルへの農業活動の変更の効果を推定するため、INRAが開発したコンピュータ・モデルを使用した。モデルMAPOD(Matrix based Approach to Pollen Dispersal(花粉飛散のためのマトリックス手法))は、以下のようなパラメータを評価する。

- ・圃場配置：
 - 圃場の形状と面積
 - GM 植物の位置
- ・気候(日別データ)：
 - 温度； 雨； 風：速度と向き
- ・花粉飛散関数のためのパラメータ：
 - 各品種の雄穂高さ
 - 非GM 品種の雌穂高さ
- ・栽培体系：
 - 播種の日付と密度
 - 開花期前の乾燥ストレス

28) 植物科学委員会の2001年3月13日の意見書 http://europa.eu.int/comm/food/fs/sc/scp/out_93_gmo_en.pdf

29) Ingram, J. (2000) Report on the separation distances required to ensure cross-pollination is below specified limits in non-seed crops of sugar beet, maize and oilseed rape (テンサイ、トウモロコシ、ナタネの非種子用作物の他家受粉が定められた限界を確実に下まわるために必要な分離距離に関する報告). MAFF Project No.: RG 0123. MAFF

30) <http://www.finances.gouv.fr/DGCCRF/actualites/index.html>

開花期中の乾燥ストレス

・品種：

植物あたりの花粉量

花粉の高温感受性

播種から雌花の開花までの必要温度

GMO の遺伝子型：同型接合性が異型接合性が

MAPOD を利用すると、雄花と雌花の開花経過がシミュレートされ、GM 品種と非 GM 品種が生産する花粉の量および非 GM トウモロコシ品種の有効な絹糸数が推定できる。花粉の生存力と絹糸の受容性に影響する要素が評価され、植物周辺の空中にある花粉の雲の状態を、全開花期間について日別に推定できる。

得られた結果は収穫物中の GM 種子の平均頻度で表され、平均値の変動は ±10% である。

表22 トウモロコシ農家の各タイプの特徴

農家	一般栽培 1	有機栽培 2	有機栽培 2'	一般栽培 5	一般栽培 3	有機栽培 4	有機栽培 4'
地区	Pau valley (フランス)			Po plain (イタリア)	Beauce region (フランス)		
	トウモロコシ集約栽培地域				トウモロコシ非集約栽培地域		
輪作	連続栽培トウモロコシ : 95%	長期輪作中のトウモロコシ		連続栽培トウモロコシ : 60% 輪作中のトウモロコシ : 40%	トウモロコシ20% / 穀物60%		
トウモロコシ / 農地面積	80%	10%		トウモロコシ 40 - 50%	10 - 20%		
農家規模	60ha		10ha	40 - 60ha	100ha		15ha
圃場サイズ	3 - 4 ha		1 - 4 ha	6 - 10ha	20ha		3 ha
播種日	4 / 20 - 5 / 1			4 / 15 - 5 / 15	4 / 10 - 5 / 1		
播種機の所有	85%が個人所有				個人所有		
開花時期	7 / 14 - 8 / 1			7 / 15 - 8 / 15	品種間 : 4 - 5 日 開花時期全体 : 約10日		
トウモロコシ圃場間距離	0.80 - 100m			2 - 6 m	500m		
収穫機の所有	85 - 90%が会社所有			60%が個人 40%が会社	50%が個人所有 - 50%が共同所有		
乾燥	95%が貯蔵組織 5%が農家			100%が作物ごとの農家組織	90%が貯蔵組織 - 10%が農家		
貯蔵	90%が貯蔵組織 10%が農家			55 - 60%貯蔵組織か飼料工場 40 - 45%農家	90%が貯蔵組織 - 10%が農家		
分離	あり もち、スウィート、Plata を分離			/	困難 (連続乾燥プロセスと短期収穫)		
農家でのトウモロコシ利用	あり (カモとガチョウ)			あり (牛)	なし		

MAPOD は、最近開発されたばかりのモデルである³¹⁾。ナタネに使用されるモデル GENESYS ほど高機能ではない。MAPOD の検証が進行中であり、モデル開発に使用しなかった別の圃場試験の結果に基づいて行われている。シミュレーション結果と圃場試験結果の最初の比較では、収穫粒中の混入率がやや過小評価されているが、大まかには信頼できることが示された。したがって、MAPOD の結果は、さまざまな栽培方法が圃場混入の可能性を下げる効果や、いくつかの品種特性の重要度を比較するために利用できる。

3.2.5 シミュレーションに用いる仮定

シミュレーションのために次の入力データを使う：

- モデル農家の特性（区画サイズ、圃場配置、栽培体系）
- 地区内の GMO の割合（10%または50%）。一般栽培農家の場合は、農家内での GM トウモロコシの割合にも反映する。
- 地区内で栽培される GM トウモロコシの品種は、導入遺伝子に関して同型接合であると仮定した。これまで開発された GM 品種はすべて異型接合なので、これは最悪のケースのシナリオである。
- 使用する種子ロットには混入がないと仮定する。2001年3月13日の植物科学委員会の意見書³²⁾で議論されているトウモロコシ種子の基準値（0.3%）を考慮すると、種子にはある程度の混入があると考えべきである。GM 品種が同型接合ならば、非 GM トウモロコシ圃場の中に GM 植物（0.3%）がランダムに分布している条件でシミュレーションすると、収穫時の混入率は0.6%に増加する。これらの知見から、0.3%の安全性の範囲を種子混入率に導入した（ $0.3 \pm 0.3\%$ ）。
- 風は、風速が4 m/秒で一定であるとし、北から南に吹くとした。
- 調査地区には、自然の障害物はない。

- トウモロコシ品種の開花時期は、どれも同じである。
- このモデルの中では、道路や他の作物など、農業景觀に存在する隔離要素は、不稔トウモロコシとして扱われる。

3.2.6 評価した混入抑制対策

3.2.6.1 圃場内混入の管理

隔離距離の拡大は、他家受粉による混入の低減のために有効な対策と考えられる。ただし、農家の圃場配置や近隣農家によっては、実施は困難な場合が多いだろう。

圃場の中央部と分けて圃場の周縁部の作物を別に収穫し、周縁部の収穫物を廃棄する。6 m幅の収穫を廃棄すると、混入レベルを約20%減らすことができる。収穫時ロスのため、この対策はかなり経費がかかるかもしれない。この対策の効果を数値化するため、MAPOD で複数のシミュレーションを実行した(表23)。これらのデータを、異なる農家タイプでの収穫廃棄の効果を決定的ために用いた(下記参照)。

表23 平均混入率に対する収穫放棄幅の影響
(同じ面積(2 ha)の GM トウモロコシ圃場と隣接する非 GM トウモロコシ圃場の場合*)

収穫放棄幅	混入率(%)	推定減少率
0 m	9.6	
6 m	7.7	- 20%
10m	7.2	- 25%
12m	6.5	- 32%
20m	5.7	- 41%

* 調査条件：GM 圃場と非 GM 圃場は隣接（距離0.8m）、風向は北から南、風速は開花期間を通じて4 m/s、非 GM 作物は GM 作物の風下であり、両品種の開花時期は同一。

31) Angevin F., Klein E., Choimet C., Meynard J. M., de Rouw A. and Sohbi Y., 2001. Rapport du groupe 3 «Isolement des collectes et maîtrise des disseminations au champ» du programme de recherche "Pertinence économique et faisabilité d'une filière 'sans utilisation d'OGM' " (第3グループ報告書：《収穫物の分離と畑における分散抑制》研究プログラム「経済影響と遺伝子組換え生物を使わない農業の存続可能性」). INRA (フランス国立農業研究所) - FNSEA, 55 p, (pp 21-36); Klein E., 2000. Estimation de la fonction de dispersion du pollen. Application a la dissemination de transgenes dans l'environnement(花粉散布関数の推定, 導入遺伝子の環境拡散への応用) These de l'Universite Paris XI, Orsay, 80 p + annexes.

32) 植物科学委員会の2001年3月13日の意見書 http://europa.eu.int/comm/food/fs/sc/scp/out_93_gmo_en.pdf

GM トウモロコシ品種の圃場を集団化して一つの「生産地区 (production island)」にすること。同じ総面積の圃場が分散して配置されている場合と比較すると、混入レベルをかなり低くできる。この対策には関係農家の協力、あるいはさらに集荷・貯蔵組織 (CSO)

との契約も必要となる。

GM 品種と非 GM 品種の開花時期をずらすこと。トウモロコシは雄性先熟であるため、開花時期をずらす効果は、GM 品種が非 GM 品種より早く開花するほうが高い (図7)。

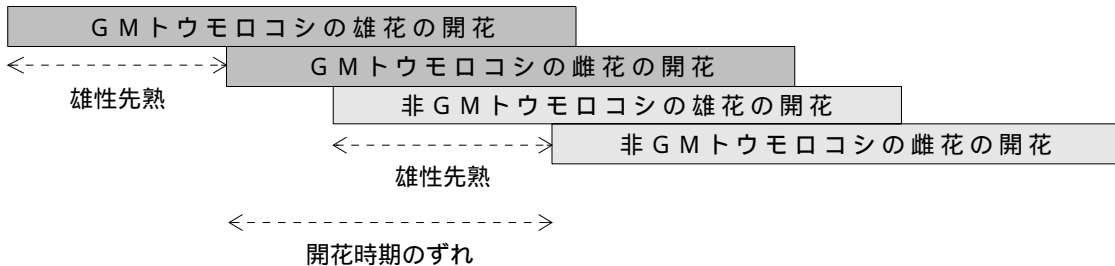


図7 トウモロコシ開花時期の差と雄性先熟

開花時期の違いを気温から計算した積算温度(度・日)で表す。トウモロコシでは、成育の速さと各成育段階の期間は積算温度によく従っており、これらは遺伝的特性である。50度・日の差は、南フランスでは約3日にあたる。

いくつかのシミュレーションを MAPOD を利用して実施し、開花時期の違いの効果を評価した (表24)。このシミュレーションの結果を、対象とした他の農家タイプに対しても適用した。

表24 平均混入率に対する開花時期の違いの効果

非 GM トウモロコシの開花時期	混入率減少の割合 (倍率)
GM 品種開花の25度日後	1.5
GM 品種開花の50度日後	5
GM 品種開花の75度日後	50
調査条件：イタリアの農家 (農家5) 地区内に50%の GM 品種がある場合	

開花の早い早生品種 (early varieties) は遅い晩生品種 (late varieties) ほど収量が高くないため、開花時期の差が大きくなるような品種を選定すると収穫に影響が出ることになるだろう。この収量の減少は GM トウモロコシ品種の方に現れるので、GM トウモロコシ農家と非 GM トウモロコシ農家との間に協力関係が成立していなければならない。晩生品種は早生品種より収量が高いが、他の種類のリスクを受けやすい。たとえば、冷涼な年や雨の多い年には晩生品種の収穫は難しくなる

(収量が減少する) だろう。

3.2.6.2 収穫後の混入の管理

異なるトウモロコシ品種に対する既存の分別業務を解析すると、GM トウモロコシと非 GM トウモロコシを分別するための3つの異なった可能性が考えられる。

- ・ CSO による GM 品種と非 GM 品種の分別集荷。収穫されたトウモロコシ子実を農家で乾燥、保存し、GM トウモロコシと非 GM トウモロコシは、異なった時期に CSO に運ぶ。トウモロコシ中の混入のレベルは農家で直接調べる。この方法は、乾燥と貯蔵の設備と検査費が必要と思われ、かなり高くつくかもしれない。
 - ・ 農家と CSO の間の契約による隔離戦略。開花期の異なる GM トウモロコシ品種と非 GM トウモロコシ品種を使うことを隔離距離に関する契約によって農家に義務付け、さらに作物の受渡し時期を決めることで隔離を実現できる。受渡し時期を決めることによって、GM 品種と非 GM 品種を別々に乾燥することが可能になる。あるいは、トウモロコシ品種が替わるごとにセンターの乾燥機を念入りに掃除してもよい。
 - ・ もっとも確実な方法は専用のサイロを取り囲むように生産地区を作ることであろう。これによって比較的高い水準の隔離が可能になり、生産物の履歴管理に役立つだろう。
 - ・ さらに徹底的な方法は GMO 無栽培地区を作ることであろう。
- 地区内と一般栽培農家で栽培されるトウモロコシの50%が GM である条件での、MAPOD によるシミュレーション結果を以下の節に示す。

3.2.7 農家1：フランスにおける集約的なトウモロコシ子実生産

農家1は農地面積のおよそ80%で、連続栽培によってトウモロコシ子実を生産している。圃場の区画は比較的に小さい(3~4 ha)。トウモロコシがこの地区での主要な生産作物であるため、圃場間の距離は短い(0.8m~100m)。農家は開花の遅い品種を使用する。表25に、

地区内と農家内のGMトウモロコシが50%のときの農家1での混入レベルを示す。現在の活動についての結果を示し、異なる対策の混入抑制の効果をシミュレートした。おもな混入源は、種子への混入、他家受粉、収穫後の作物の取扱いである。結果は収穫されたトウモロコシ子実中の混入%で表している。

表25 農家1における混入レベルの推定(地区内と農家内に50%のGMOがある場合)*

農家1	現在の活動	他家受粉を抑制するために導入した変更					
		廃棄幅 6m***	最低距離 100m	最低距離 200m	開花時期 の違い (25度日)	開花時期 の違い (50度日)	開花時期 の違い (75度日)
種子	0.5 (±0.2)	0.3 (±0.3)	0.3 (±0.3)	0.3 (±0.3)	0.3 (±0.3)	0.3 (±0.3)	0.3 (±0.3)
播種/耕作機械	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
他家受粉	1.5	1.2	1	0.5	1	0.3	0.03
収穫/圃場-貯蔵施設 間輸送/圃場からの輸送	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
貯蔵/清掃/乾燥	0.2 (±0.15)	0.01**	0.01**	0.01**	0.01**	0.01**	0.2 (±0.15)
予想される合計混入	2.25% (±0.35%)	1.56% (±0.3%)	1.36% (±0.3%)	0.86% (±0.3%)	1.36% (±0.3%)	0.66% (±0.3%)	0.58% (±0.45%)
* 結果は収穫物中のGM子実%で表示 ** 機材が完全に専用の場合 *** 圃場が隣接している条件 変更は太字							

現在の活動では、種子混入の数値を、米国から輸入された最近のトウモロコシ品種の種子にGMトウモロコシがさまざまな程度で混入していることを示すフランスのデータをもとにして決めた。他の場合ではすべて平均混入種子を0.3%と仮定した。

GM圃場が非GM圃場と隣接している場合は、周縁部6mを廃棄しても1%の基準値未満に混入を減らすことはできない。圃場間の距離を100mとした場合も同様である。200mを最低距離にして、収穫後の作物の取扱いを同時に改善したとしても、混入レベルはやっと1%を下まわるほどにしかない。もっとも効果的な方法は、開花時期が50度・日以上異なる品種を使うことであろう。これによって他家受粉のレベルはかなり低下する。さらに収穫後の取扱いを変更して混入を抑えると、その

結果は1%の混入率を十分に下まわる。この地区ではもちトウモロコシの生産が分別されているため、既存のシステムがGMトウモロコシに応用できるであろう。75度・日の開花時期のずれを利用すると、収穫後の取扱いを変更しなくても1%未満の混入レベルを達成できる。

GMを含まない種子を使った場合でも、すべてのシミュレート条件で混入率は0.1%を上まわるだろう。

これらはシミュレーションの結果であり、いくつかの仮定に基づいていることをここで強調しておかなければならない。さらに、計算に使用したモデルからの出力は相対的な数値である。ここで示す結果は、他家受粉を介した混入の低減に関して、異なる農業活動の効果を比較するために利用できる。

3.2.8 農家5：イタリアにおける集約的なトウモロコシ子実生産

この農家は北イタリアのポー川流域の平野にある。農家1と農家5は共通した多くの特徴を持っている。設備の使用と所有の条件はよく似ており、乾燥と貯蔵の条件も同様である。貯蔵施設は農家や協同組合の間に分散しており、異なるタイプの生産を分別できる可能性がある。

2つの農家のおもな違いは、以下のとおりである。

- イタリアの農家（農家5）の方が区画サイズが大きい（6 ha ~ 10 ha）
- トウモロコシは輪作でも栽培される（トウモロコシの60%だけが連続栽培される）
- イタリアの農家の周辺環境ではトウモロコシの割合

が小さい（40% ~ 55%）

農家5における他家受粉の可能性は、収穫後の混入の可能性が同程度であるにもかかわらず農家1よりも低い（表26）。200m以上の距離をおいて、さらに収穫後の作業を変更すると混入レベルを1%未満に抑えることが可能であろう。農家1とは異なり、農家5の農業景観の中でならこれを実行できるであろう。また、開花期間の違いが25度・日より大きければ、収穫後の業務を変更しなくても十分な効果がある。

GMを含まない種子を使ったとしても、混入率を0.1%以下にすることは、どのシミュレート条件においても無理であろう。

表26 農家5における混入レベルの推定（地区内と農家内に50%のGMOがある場合）*

農家5	現在の活動	他家受粉を抑制するために導入した変更					
		廃棄幅 6 m***	最低距離 100m	最低距離 200m	開花時期 の違い (25度日)	開花時期 の違い (50度日)	開花時期 の違い (75度日)
種子	0.5 (±0.2)	0.3 (±0.3)	0.3 (±0.3)	0.3 (±0.3)	0.3 (±0.3)	0.3 (±0.3)	0.3 (±0.3)
播種/耕作機械	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
他家受粉	1.0	0.8	0.66	0.33	0.66	0.2	0.02
収穫/圃場 - 貯蔵施設 間輸送/圃場からの輸送	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
貯蔵/清掃/乾燥	0.2	0.01**	0.01**	0.01**	0.01**	0.2	0.2
予想される合計混入	1.75% (±0.2%)	1.16% (±0.3%)	1.02% (±0.3%)	0.69% (±0.3%)	1.02% (±0.3%)	0.75% (±0.3%)	0.57% (±0.3%)

* 結果は収穫物中のGM子実%で表示
 ** 機材が完全に専用の場合
 *** 圃場が隣接している条件
 変更は太字

3.2.9 農家2と農家2'：南フランスにおける有機栽培によるトウモロコシ子実生産

有機栽培の農家2と農家2'は農家1と同じ地区にある。トウモロコシは輪作で栽培され、作物栽培面積の10%だけを占めている。この輪作の結果、農家は農地の端にトウモロコシ栽培圃場を置くことをつねに避けるわけにはいかない。したがって、混入の可能性は近隣圃場のト

ウモロコシと他家受粉におもに関係する。機械を近隣農家と共有している場合でも機械をよく掃除するので、収穫後の混入は低い。農家2'は農家2と同一の農業システムを実施しているが、総面積は小さく、圃場の区画も小さい（表22を参照）。そのため、花粉による遺伝子流動の影響を受けやすい。

表27と表28に、農家2と農家2'の状態を要約する。

表27 農家2における混入レベルの推定(地区内に50%のGMOがある場合)*

農家2	他家受粉を制限するために導入した変更					
	現在の活動	廃棄幅 6 m**	最低距離 300m	開花時期の 違い (25度日)	開花時期の 違い (50度日)	開花時期の 違い (75度日)
種子***	0.05 (±0.04)	0.05 (±0.04)	0.05 (±0.04)	0.05 (±0.04)	0.05 (±0.04)	0.05 (±0.04)
他家受粉	0.08% (±0.03)	0.06%	0.04%	0.05%	0.02%	0.01%
収穫/圃場-貯蔵施設間 輸送/貯蔵、清掃、乾燥 /粉砕/農家からの輸送	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
予想される合計混入	0.16% (±0.07)	0.14% (±0.04)	0.12% (±0.04)	0.13% (±0.04)	0.1% (±0.04)	0.09% (±0.04)
* 結果は収穫物中のGM粒の%で表示 ** 圃場が隣接している場合 *** 混入種子%は推定値 変更は太字						

農家1と比較すると、使用種子への混入割合が低いことと、隔離距離が長いために他家受粉の頻度が低いことによって、混入のレベルはずっと低い。また、(有機生産のため)保管、清掃、乾燥において分別システムを実施しているため、収穫後の混入レベルが低い。推定され

る混入レベルは、どのシミュレート条件でも十分に1%を下まわるが、0.1%よりは大きい。開花時期の違いを75度・日にしたとしても、全体の混入レベルは0.1%に近づく程度になるだけである。

表28 農家2'における混入レベルの推定(地区内に50%のGMOがある場合)*

農家2'	他家受粉を制限するために導入した変更					
	現在の活動	廃棄幅 6 m**	最低距離 300m	開花時期の 違い (25度日)	開花時期の 違い (50度日)	開花時期の 違い (75度日)
種子***	0.05 (±0.04)	0.05 (±0.04)	0.05 (±0.04)	0.05 (±0.04)	0.05 (±0.04)	0.05 (±0.04)
他家受粉	0.5%	0.4%	0.25%	0.33%	0.1%	0.01%
収穫/圃場-貯蔵施設間 輸送/貯蔵、清掃、乾燥 /粉砕/農家からの輸送	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
予想される合計混入	0.58% (±0.04)	0.48% (±0.04)	0.33% (±0.04)	0.41% (±0.04)	0.18% (±0.04)	0.09% (±0.04)
* 結果は収穫物中のGM粒の%で表示 ** 圃場が隣接している場合 *** 混入種子%は推定値 変更は太字						

小規模な農家 2' での混入レベルは、予想されるとおり農家 2 の場合よりかなり高い。それでも、そのレベルは農業活動を変更しなくても 1% を下まわる。75度・日の開花時期の差を利用すると他家受粉による混入はかなり減少するが、全体の混入率はやはり 0.1% にごく近い程度である。

3.2.10 農家 3：一般栽培による非集約的なトウモロコシ子実生産

農家 3 は、中央フランスのボース (Beauce) 地方に位置している。トウモロコシは他の作物とともに輪作されており、各年の農家面積の約 20% (正確には 1 年ごとに 1 圃場) に相当する。GM トウモロコシと非 GM トウモロコシを交互には栽培しても、同じ年には栽培しない。機械類は近隣農家と共有し、センターの連続乾燥設

備を使う。

トウモロコシ圃場間の平均距離はすでに 500m ある。他家受粉をさらに減らす方法としては、GM トウモロコシと非 GM トウモロコシの開花日をずらすことだけが可能である。開花時期のずれは、使用する品種 (早生 (early) から中早生 (mid-early)) に制限があるため、25度・日と 50度・日とする。結果を表 29 に示す。

現在の農業活動のままでの混入レベルは 1% に近い。収穫物への混入レベルを確実に 1% 未満にするには、収穫後の作物の取扱いを変更しなければならない。ここでは、「契約による隔離」の戦略と機械の完全な専用化がもっとも適していると思われる (予想される合計混入率は $0.51\% \pm 0.3\%$)。開花時期のずれを導入して圃場内での混入をさらに抑制しても、0.1% の基準値は達成できない。

表 29 農家 3 における混入レベルの推定 (地区内に 50% の GMO がある場合) *

農家 3	現在の活動	他家受粉を制限するために導入した変更	
		開花時期の違い (25度日)	開花時期の違い (50度日)
種子***	0.1 (±0.05)	0.3 (±0.3%)	0.3 (±0.3%)
播種 / 耕作機械	0	0	0
他家受粉	0.15 (±0.05)	0.1	0.03
自生植物 / 収穫 / 畑から貯蔵施設への輸送 / 農家からの輸送	0.05	0.05	0.05
貯蔵 - 掃除 / 乾燥	0.5 (±0.4)	0.01**	0.01**
予想される合計混入	0.8% (±0.5%)	0.46% (±0.3%)	0.39% (±0.3%)
* 結果は収穫物中の GM 子実% で表示 ** 機材が完全に専用の場合 *** 混入種子% は推定値 変更は太字			

3.2.11 農家 4 と農家 4'：中央フランスにおける有機栽培によるトウモロコシ子実生産

農家 4 は有機栽培農家である以外は農家 3 と同様である。農家 4' は農家と区画の規模 (それぞれ 15ha および 3ha) の影響を調べるための、農家 4 の小規模版である。合計混入レベルは予想されたように農家 3 のときより低く、1% を大きく下まわっている (農家 4 では 0.17%、農家 4' では 0.32%)。他家受粉が主要な混入源である。

50度・日の開花時期の違いによって他家受粉が減るが、0.1% の基準値を十分な安全性をもって満たすことはできない (農家 4 では 0.13% ; 農家 4' では 0.9%)。

3.2.12 地区内に 10% の GMO があるときの混入レベル

地区内の GMO シェアを 10% としたときのシミュレーションの結果は、予想されるとおり、すべての農家で低い他家受粉レベルを示す。混入レベルのシミュレーショ

ン結果を、GMO シェアが50%の場合と比較して表30に示す。他家受粉以外の混入源は変更していない。

トウモロコシが集約的に栽培されている農家1と農家5は別として、すべての農家では、地区内のGM トウモロコシが10%の場合は混入レベルが十分に1%を下まわる。混入のレベルはつねに0.1%の基準値より高いが、

推定した収穫後の混入レベルは10%の状況にあわせては修正されていないことに注意が必要である。混入レベルを低下させるため、地区内に50%のGM トウモロコシがある場合に提案されたのと同じ対策が適用できる(結果は示していない)。

表30 地区内の GMO 比率が10%および50%の場合の各農家タイプでの混入率の比較

	農家タイプ	1	2	2'	3	4	4'	5
景観中の GMO が10%	現在の活動 他家受粉(%)*	0.25	0.02	0.1	0.03	0.04	0.05	0.2
	予想される合計混入率** (%)*	1 (±0.35)	0.1 (±0.07)	0.18 (±0.04)	0.68 (±0.5)	0.09 (±0.09)	0.12 (±0.04)	0.95 (±0.2)
景観中の GMO が50%	現在の活動 他家受粉(%)*	1.5	0.1	0.5	0.15	0.15	0.25	1.0
	予想される合計混入率(%)*	2.25 (±0.35)	0.16 (±0.07)	0.58 (±0.04)	0.8 (±0.5)	0.17 (±0.09)	0.32 (±0.04)	1.75 (±0.2)

* 結果は収穫物中の GM 子実%で表示
 ** 他家受粉による混入率は、景観中の10%の GMO 比率を考慮して変更した。他の経路での混入の推定は変更していない。

3.2.13 農業活動の変更のための諸費用

いくつかのシミュレーションの結果から、収穫物の一部を廃棄することは、少なくとも計算で仮定したように圃場が隣接している場合には、他家受粉の問題の解決にはほとんど役立たないことが示された。一方、隔離距離の拡大と開花時期の異なる品種の導入は効果的な方法であると思われる。農家タイプによっては、さらに収穫後のトウモロコシ子実の取扱いを変更する必要がある。

隔離距離の拡大についての経済的な側面を評価することは難しい。この対策は、その農家の圃場の再配置や農家間の良好な協力関係と関連する。これらの費用を推定するには、この研究では扱わなかった経済的な分析がさらに必要である。同じことが生産地区を形成することについても言える。

開花時期が異なるトウモロコシ品種を導入するための追加費用が推定できる。開花の遅い品種は一般に収量が高いが、その年の後の方の悪天候による収量低下のリスクもある。GM 品種は開花の早い品種であるため、一般的に低い収量による収量低下がGM トウモロコシ栽培者に生じるはずである。費用の計算は開花の早い品種と遅い品種の間の収量差に基づいている(表31)。

開花期が異なるトウモロコシ品種の収量は、GM 品種と非 GM 品種に大きな収量の差はないと仮定して、非 GM 品種の収量を使用している。データは最大限の植物保護を実施した小規模圃場試験によるものである。したがって、その収量は農家の圃場で通常の条件で得られるよりも高い(10%から15%)。けれども、これらのデータの使用は収量を適切に比較するための最適な方法である(気候と土壌に差がなく、試験全体で同一の管理を実施している)。

農家1では、GM トウモロコシ品種を晩生から中早生に変更して開花時期の違いを50度・日にした場合、予想される損失は約45.4ユーロ/haになる(助成金を加えた売上総利益の5%から6%)。これらの費用はGM 品種の開花を早めたことによるものである。GM トウモロコシ品種を極晩生(very late)から晩生(late)に変更すると(開花時期の違いは25~50度・日)収量の低下が非常に大きく、費用は205.3ユーロ/ha、助成金を加えた売上総利益の20%から25%にもなる。費用は変動しやすく、75度・日の違いを仮定すると、費用はもっと高くなるだろう。この研究では、GM 作物を栽培する農家は混入を最小限に抑える対策を要求されないと仮定している

ため、生じた費用はすべて非 GM 作物農家が負担すると想定する。開花の早い品種を栽培する GM 作物農家と開花の遅い品種を栽培する非 GM 作物農家との組合せが、追加費用を最小限に抑えることができるだろう。晩生品種を使う農家 1 での追加費用を計算するために、晩生品種から早生品種への変更費用 (45.5ユーロ/ha)

を使用した。

収穫後の農家活動の変更には、一部にほかの農家や CSO を含む農家圃場の再配置あるいは乾燥や貯蔵の設備への支出が必要であるが、これらの費用の推定は複雑であり、この研究の範囲を越えている。

表31 開花時期の変更による収量の低下と費用 (農家 1)

開花時期の変更	極晩生から晩生に変更	晩生から中早生に変更
開花時期の差 (度・日)	25 - 50	50
極晩生 / 晩生品種の収量 (t/ha) ⁽¹⁾	15.48	13.40
晩生 / 中早生品種の収量 (t/ha) ⁽¹⁾	13.40	12.94
収量の低下 (t/ha)	2.08	0.46
トウモロコシの価格 (EUR/t) ⁽²⁾	98.7	98.7
損失費用 (EUR/ha)	205.3	45.4
損失費用 (EUR/t)	15.3	3.5
出典 : (1) AGPM 試験 (1999年および2000年) ³³⁾ , (2) Les quatre saisons Sud-Adour-no.83. 3年間の平均 (1997~1999年) ³⁴⁾		

3.2.14 トウモロコシについての総合的な結論

表32 a と表32 b に、1%と0.1%の仮の基準値を各農家が達成するための活動案の概要を示す。ここでは、モデル MAPOD はシミュレートされた活動における混入の値の比較に適したものであることを強調しなければならない。シミュレーションで得られた絶対的な数値はあまり正確ではなく (相対的な値は正確である) モデルを微調整するための予備試験によれば、混入値は過小に評価されているらしい。それゆえ、これらの結果は各農業活動が混入を減らす効果を比較するにもっとも適している。

局所的な混入レベルに影響するおもな要因は、次のとおりと思われる。

- ・ 種子混入率
- ・ 農業景観におけるトウモロコシの相対的割合
- ・ 圃場 (花粉放出側と受容側) の相対的な大きさと圃場の配置

・ 収穫したトウモロコシ子実の集荷、乾燥と貯蔵の作業

トウモロコシ子実生産の研究のために設定した条件では、地区内の GMO シェアが10%の場合であっても、現在の活動と変更した活動のいずれでも、また有機栽培農家と一般栽培農家のいずれでも、0.1%という非常に低い基準値は達成できない。種子への混入が予想される上に、農家内の収穫物管理による収穫後の混合があるため、非常に厳密な分別は不可能であるためである。

この研究における一般栽培農家は、地区内で栽培されるトウモロコシの10%のみが GM である場合でも、1%の基準値を満たすために業務を変更しなければならない。農家 1 と農家 5 では隔離距離を広げるという解決策があるが、地区の構造とトウモロコシの集約的栽培を考えると、その実行は容易ではない。GM 品種と非 GM 品種の開花時期をずらすことがもう一つの解決法であるが、これにも協力関係が必要である。

これらの結果は、一般栽培農家では0.3%以上の種子

33) AGPM, 2000. Valeur culturale des varietes inscrites en 2000 au catalogue officiel et disponibles en France en 2000 (2000年公式目録登録品種および2000年にフランスで使用可能な品種の栽培価値); AGPM, 2000. Etude des couts de production et evolution (生産費変動調査).

34) Les 4 saisons Sud-Adour (四季 南アドゥール) - Printemps 2000 (2000年春号). No.83.

混入があるという仮定に強く影響されている。植物科学委員会は、2001年3月13日の、一般栽培種子中へのGM種子の非意図的な混入に関する意見³⁵⁾で、トウモロコシについて議論されている0.3%の基準値は理想的な条件でしか達成されないと述べている。この意見に従って、この研究においてもある一定の混入があることを考慮した。しかし、たとえ混入種子がまったくないと仮定しても、ほかの混入源もあるため、0.1%の達成はやはり非

常に困難だろう。

この研究における有機栽培農家では、小規模な農家であっても1%の基準値の達成は難しくない。これは、利用される(有機栽培)種子への混入が比較的少ないことと、収穫後の分別が効果的であることによる。だが、有機栽培農家でも0.1%のような厳しい基準値を、安全範囲を見込んで達成することは難しい。

表32 A 現在の農業活動と推奨する農業活動による一般栽培農家と有機栽培農家の粒トウモロコシ生産における混入率の要約(地区内のGMO比率が10%の場合)

農家のタイプ	一般栽培 1 (農家内で GMOを 10%栽培)	有機栽培 2 (大規模)	有機栽培 2' (小規模)	一般栽培 3 (農家内で GMOを 10%栽培)	有機栽培 4 (大規模)	有機栽培 4' (小規模)	一般栽培 5 (農家内で GMOを 10%栽培)
現在の活動 予想される合計混入率	1% (±0.6%)	0.1% (±0.07%)	0.18% (±0.04%)	0.68% (±0.5%)	0.09% (±0.09%)	0.12% (±0.04%)	0.95% (±0.2%)
基準値1%を満たすための最良の活動への変更 予想される合計混入率	隔離距離 200m 0.63% (±0.3%) <small>(1)(3)</small>	現在の活動	現在の活動	収穫後管理 ⁽²⁾ 0.39% (±0.3%) <small>(1)</small>	現在の活動	現在の活動	隔離距離 100m 0.68% (±0.3%) <small>(1)(3)</small>
追加費用 (EUR/ha)	n.d.	0	0	n.d.	0	0	n.d.
基準値0.1%を満たすための最良の活動への変更	達成は不可能						
(1) 混入種子の割合は0.3% (±0.3%) であると仮定 (2) 変更は、サイロを専用にすること、あるいは、トウモロコシの種類が変わるときに、乾燥ユニットを空にして、乾燥済みの子実を徹底的に除去すること (3) もう一つの方法は、50度・日の開花期の違いを導入することであり、追加費用は45.5EUR/ha(0.6%±0.45%)となる。これには、GMトウモロコシの生産者が栽培品種を変更する必要があり、実行はもっと難しい。 n.d.: 算出していない							

35) 植物科学委員会の2001年3月13日の意見書 http://europa.eu.int/comm/food/fs/sc/scp/out_93_gmo_en.pdf

表32B 現在の農業活動と推奨する農業活動による一般栽培農家と有機栽培農家の粒トウモロコシ生産における混入率の要約 (地区内の GMO 比率が50%の場合)

農家のタイプ	一般栽培 1 (農家内で GMOを 10%栽培)	有機栽培 2 (大規模)	有機栽培 2' (小規模)	一般栽培 3 (農家内で GMOを 10%栽培)	有機栽培 4 (大規模)	有機栽培 4' (小規模)	一般栽培 5 (農家内で GMOを 10%栽培)
現在の活動 予想される合計混入率	2.25% (±0.6%)	0.16% (±0.07%)	0.58% (±0.04%)	0.8% (±0.5%)	0.17% (±0.19%)	0.32% (±0.04%)	1.75% (±0.2%)
基準値1%を満たすための最良の活動への変更 予想される合計混入率	50度日の 開花時期の 違い+ 収穫後管理 0.66% (±0.3%) (1)	現在の活動	現在の活動	収穫後管理 (2) 0.51% (±0.3%) (1)	現在の活動	現在の活動	隔離距離 200m + 収穫後管理 0.69% (±0.3%)
追加費用 (EUR/ha)	45.4 + n.d.	0	0	n.d.	0	0	n.d.
基準値0.1%を満たすための最良の活動への変更	達成は不可能						
(1) 混入種子の割合は0.3% (±0.3%) であると仮定 (2) 変更は、サイロを専用にすること、あるいは、トウモロコシの種類が変わるときに、乾燥ユニットを空にして、乾燥済みの子実を徹底的に除去すること n.d. : 算出していない							

3.3 食用ジャガイモの生産

3.3.1 作物の生産と利用

ジャガイモ (*Solanum tuberosum*) は、その塊茎を利用するために栽培される多年生植物である。塊茎は植物体の根に着生し、親植物体のクローンである。ジャガイモは、種いもあるいは種ジャガイモと呼ばれる栄養茎 (vegetative tubers) から、一年生作物として栽培される。栄養茎は、植物の地上部が秋に枯れても土中で生存できる。種子の生産に関しては、開花が見られる程度、開花期間、環境条件に対する着花反応は、品種によって大きく異なる。花が発達しても着果する保証はなく、また欧州の一部の圃場条件では花粉不稔がよく見られる。

EU は、現在、中国に次ぐ世界第2位のジャガイモ生産地である (世界の生産量のそれぞれ16%と19%)。認証種いもは、主要な生産地から離れた農場で、ウイルス感染を最小限にできるスコットランドなどのような地域で、専門の栽培者によって生産される。一部の栽培者は、認証種いもから育った健康な作物から小さいもを保存して次の種いもにする (英国では植え付けられるジャガイモの27%が自家保存種いも)。

1999年には、ウイルスと害虫に抵抗性のある GM ジャガイモが世界で約4万ha栽培された (米国が3万ha、カナダが1万ha、ルーマニアとウクライナが各1,000ha)³⁶⁾。EUではGMジャガイモの市場流通はまだ認可されていない (2001年11月現在) が、デンプンの成分構成を改変したGMジャガイモの申請が未決定となっている。GMジャガイモは、おもに米国とカナダの農家で広く使われているが、モンサント社はGMジャガイモについての研究活動とマーケティングを縮小すると言われており、他のGM作物ほどには成功していないように思われる³⁷⁾。

ジャガイモは、現在、もっぱら人の直接の食用に利用されている。極早生 (first early) と早生 (second early) のジャガイモは、やや甘くデンプンが少ない「新ジャガイモ (new potatoes)」を6月から8月に出荷するために栽培されている。これらのジャガイモはゆでて食べられることが多い。これらはEUのジャガイモ全生産量のおよそ8.4%にあたる。中生のジャガイモ (main crop

potatoes) は夏の終わりに掘りとられ、そのまま出荷または加工されるか保管される。このジャガイモは用途が広く、焼いたり、揚げたり、ゆでたりして利用される。また特別な品種が特定の料理や加工の用途のために栽培されている。

3.3.2 混入の経路

3.3.2.1 花粉による遺伝子流動

ジャガイモはおもに自家受粉し、圃場条件での他家受粉の割合は0~20%の範囲である³⁸⁾。他家受粉においては風による媒介が昆虫よりも重要であると考えられる。圃場試験では、ジャガイモ圃場のすぐ近辺 (5mから10m) を越える花粉の分散はきわめて少なかった。GMジャガイモ圃場からの花粉分散については、受精と種子生産の過程が収穫される生産物に影響しないため、受入れ側の作物に直接には影響しそうにない。この作物は種子ではなく種いもで植えられるため、GM混入物は子孫の作物には伝わらない。

3.3.2.2 種子による遺伝子流動

多くのジャガイモの品種は、ジャガイモ種子を作ることができ、種子は圃場条件で8年間以上生存しうる。これらの種子が他家受粉の産物であると、その後のジャガイモ作物に混入する可能性がある。

自生ジャガイモ (groundkeeper) は、農家における重要な雑草問題である。種子、収穫されなかった塊茎、および損傷した塊茎のかけらが地中に生き残って翌年に芽を出し、次の作物の中の雑草植物になる。これらが次に小さな塊茎を作り、その塊茎が残って、翌年以降のジャガイモ作物に混入する。ジャガイモの自生植物は、エンドウ類、豆類、テンサイなど広葉の作物の中では除草剤による防除が困難で、手で取ることも難しい。自生ジャガイモの防除がうまくいかないと、ジャガイモの個体数がそのまま維持されたり、あるいは輪作の間に増加することになり、次のジャガイモ作物に混入することになる。

野生化したジャガイモ植物が、GM花粉の放出側や受入れ側のいずれかになる可能性は小さいか、まったくない。データからは、ジャガイモからその近縁野生種であ

36) European Commission, DG Agriculture 2000. Economic impacts of genetically modified crops in the agri-food sector (農業食品部門における遺伝子組換え作物の経済影響)。

37) ESA Newsletter May 2001. <http://www.entsoc.org/newsletter/2001/May/window.htm>

38) Plaisted, R. L. (1980) Potato. In: Fehr, W. R. & Hadley, H. H. (eds.) Hybridisation of crop plants. American Society of Agronomy, Madison, pp. 483-494.

る *S.nigrum* (イヌホオズキ) と *S.dulcamara* (ツルナス) への自然な遺伝子拡散はありそうもない。

3.3.2.3 非意図的な混合

耕作と収穫の際の混入の可能性はかなり低いと考えられる。一方、収穫後の作物の取扱い(貯蔵、選別、洗浄、梱包)は、主要な混入原因になりうる。

3.3.2.4 種いもへの混入

認証種いもは、通常、隔離された場所の専門農家で、高い基準の隔離と品種純度で生産される。もっとも混入がありそうなのは、GM 作物が大規模に栽培されている地区で生産された種いもと、GM 品種の種いもの生産もしている業者から購入した種いもである。現在、GM ジャガイモの商業生産は欧州では行われておらず、そのため、欧州で生産される種子と種いもへの混入はほとんどありえない。

3.3.3 代表的な農家タイプ

ジャガイモの生産を、2つの異なった農家タイプを使って調査した。一般栽培の農家1はイングランドの東

アングリア地域 (East Anglia region) あるいはドイツのニーダーザクセン (Niedersachsen) 州に位置している。この農家は、市場への直接出荷と加工用に5年から6年の輪作でGM ジャガイモと非GM ジャガイモを栽培している。十分な機械類を備え、ジャガイモの洗浄、選別、箱詰め、梱包をする中央施設を持っている。この施設は近隣の農家も使用する。この農家はいくつかの品種の種いもを保存する。農家2はこの農家に対応する有機栽培農家である。農家3は早生ジャガイモを栽培している典型的な一般栽培農家であり、イングランド南西部あるいはドイツ北西部に位置している。作物の約半分に認証種いもを使い、残りは農家保存種いもを使って栽培している。市場の要求に応じるため、同じ圃場を区切って複数の品種を栽培することが多い。ジャガイモは農家で袋詰めまたは箱詰めされて協同組合に運ばれる。そこで他の収穫物と一緒に荷造りされることもある。この農家は機械をかなり備えているが、近隣農家と共同で使うこともある。農家4は農家3に対応する有機栽培農家である。

農家の特性の要約を表33に示す。

表33 ジャガイモ農家の各タイプの特性

農家	一般栽培 1	有機栽培 2	一般栽培 3	有機栽培 4
	調理・加工用のジャガイモを栽培		調理用の早生ジャガイモを栽培	
地域	East Anglia 地域 (英国) および Braunschwig 市 (ドイツ)		イングランド南西部およびドイツ北西部	
農家規模	300ha (英国) / 150ha (ドイツ)		75ha	
ジャガイモ面積 / 農地面積	20%	17%	20%	
GM 品種割合	20 - 30%	なし	50%	なし
種いも供給源	保証と保存	保証と保存(大部分)	保証と保存(半分ずつ)、近隣農家と交換あり	保証と保存(農家内の隔離圃場)
輪作年数	5年から6年	6年以上	5年	6年以上
除石、植付け、うね立て、床作りの機械	あり、他の農家と共有がある	あり	あり、他の農家と共有がある(故障時)	あり、他の農家と共有がある
収穫機	2台	あり	あり、他の農家と共有あり(故障時)	あり、他の農家と共有あり
洗浄、選別、箱詰め、梱包の設備	あり、他の農家と共有あり	あり	あり、他の農家と共有あり	なし
貯蔵設備	あり	あり	あり	なし
分別	ジャガイモ品種間	すでに実施(有機農業)	なし	すでに実施(有機農業)

3.3.4 混入レベルの推定

ジャガイモの場合、農家内での混入レベルの予測に利用できるコンピュータ・モデルはなかった。かわりに、国立農業植物研究所(NIAB、英国)と国立農業研究所(INRA、フランス)の種子認証と農学の専門家委員会によって推定が行われた。この推定では、地区内と一般栽培農家でのGMジャガイモ栽培は25%から50%と想定した。

3.3.5 評価した混入抑制対策

3.3.5.1 他家受粉

ジャガイモ品種のほぼ全部が栽培中に開花するが、欧州では不稔であることがほとんどである。したがって、混入につながる他家受粉の可能性はきわめて小さい。実をつける品種(Saturna、Kaptah Vandel)もいくつかあるが、これらはGMジャガイモの近くに植えてはならない(隔離距離20m以上)。自生ジャガイモを完全に除去できない場合は、この類の品種の後にGMジャガイモを栽培することも避けなければならない。さもなければ自生ジャガイモと翌年以降のGM作物との間で交雑が生じることがある。これらの勧告に従えないときは、自生ジャガイモを厳しく管理しなければならない(下記を参照)。

3.3.5.2 自生ジャガイモ

耕作された圃場中の自生ジャガイモは、除草剤の使用あるいは輪作の変更によって抑制できる。

一般栽培においては、自生ジャガイモが双子葉類の作物の中にあると、使用できる選択性の除草剤がないために抑制が難しいが、単子葉類の作物の中では容易に抑制できる(メスルフロンメチルなどが使用できる)。フランス北部で行われている輪作(ジャガイモ/冬小麦/テンサイ/ジャガイモ)のように輪作の中でジャガイモの後に穀類を入れると、この類の技術的な解決が容易になる。

輪作の周期を長くすることは、考えられるもう一つの抑制手段である。次にジャガイモを栽培する時期を7年後(あるいはそれ以降)に変更すると、自生ジャガイモの数は大幅に減少する。この対策は、圃場の中に残っているジャガイモ残さ(損傷したいもや小さいも)を、収穫後に通常行われているように圃場の縁に積んでおくのではなく、すべて除去することと組み合わせることも考えられる。

除草剤の施用は有機農業では禁止されている。この問

題への1つの技術的解決策として、輪作を変更し、機械による除草(中耕除草あるいはホー除草)が可能かつ効果的になるような作物(あるいは休閒や雑草抑制植物)を導入することがあげられる。プラウ耕も雑草とくに自生ジャガイモを抑制するために使用できる。圃場に残存する作物残さの除去も勧められる。

3.3.5.3 保存種いも

農家保存種いもの純度を確保するためには、保存される種いも(GMまたは非GM)の種類ごとに隔離された専用の圃場を使われなければならない。農業主はその農家の各圃場での作物のタイプと栽培業務を記録し、輪作中の自生ジャガイモを抑制しなければならない(圃場の中で複数の種類のGM自生ジャガイモが共存することを防ぐ)。これをできない場合は、自生ジャガイモを非常に厳しく抑制しなければならない(上記を参照)。

3.3.5.4 収穫後の混入

収穫後の混入は非GM品種とGM品種を栽培する農家にとって重要なリスクである。混合を最小にするための重要な要素の1つは、各区画で何を栽培しているかを正確に記録し、収穫を効果的に調整し、各収穫物に表示付けをすることである。収穫物の履歴管理システムを作らなければならない。また、ばら積みでの貯蔵を避け、箱を使った貯蔵を採用しなければならない。このようなシステムは、加工業者と契約して栽培されるジャガイモでは、すでに採用されている。この種の分別システムは、デンブン用ジャガイモや調理用ジャガイモを生産する農家でも作ることができる。

3.3.6 農家1: 一般栽培による調理・加工用ジャガイモの生産

農家1ではGM品種と非GM品種を栽培しており、混入の可能性は生産のすべての過程(栽培、収穫、集荷、貯蔵)で考えられる。主要な混入源である自生ジャガイモを減らすため、ジャガイモの後に新たに穀類を栽培する長期輪作の導入が推奨される。圃場に残存するすべての作物残さは堆肥にするか、できれば除去しなければならない(上記参照)。

この農家は自分の倉庫を持っているので収穫後のGM品種の分別が可能だろう。これには、GMや非GMの収穫物に適切なラベルを付けて梱包することが必要である。

農家1での混入レベルの推定値を表34に要約する。現

在の農業活動のままでは1%の混入レベルを下まわらざる生産が可能と思われる。しかし、推定される混入レベルは0.1%を上まわっている。推奨した変更に従ったとしても、この非常に低い混入レベル(0.1%未満)は達成できないだろう。

3.3.7 農家2：有機栽培による調理・加工用ジャガイモの生産

農家2は一般栽培のジャガイモ生産者と機械を共有しているため、収穫後の作物の取扱いである選別作業(洗浄と梱包)が混入原因の一つになる。しかし、分別が実施されているため、一般栽培と比較すると混入のレベルはすでに非常に低い。

主要な混入源の一つは自生ジャガイモである。農家2での輪作は十分に長く、また輪作間のさまざまな作物の中に存在する自生ジャガイモの数を減少させることができる対策は、すでにどれも使われている。圃場に残っているジャガイモ残さを徹底的に除去する以外に、輪作の中に(地力維持と雑草抑制を兼ねた)休閑期を導入すること、あるいは機械除草が可能な作物を導入することが勧められる。

農家2での推定混入レベルを表34に要約する。予想されるとおり農家1に対応する有機栽培農家での混入レベルはかなり低く、約0.1%と推定される。各栽培段階での混入の可能性が少しずつあるため、この混入レベルはほとんど減らせない。

3.3.8 農家3：一般栽培による調理用早生ジャガイモの生産

農家3では自生ジャガイモと収穫後管理についての問題があり、また農家保存種いもの純度についても問題がある。これらの種いものは原則として隔離生産されるが、それが近隣の農家と交換されることがある。農家3では収穫機や除石機の共有と関連する潜在的な問題も持っている。

自生ジャガイモを抑制するために推奨される対策は、農家1のときと同じである。収穫後のジャガイモ管理については、さまざまな品種を物理的あるいは時間的に分離することが、異なった品種タイプごとに選別機と梱包機を清掃することとともに推奨される。植付けと収穫の日を操作して、GM品種がすべて同時に収穫されるようにすることができる。農家間の種いもの交換は避けるべきである。設備の共有には徹底的な掃除が必要である。

農家3での推定混入レベルは表34に要約されている。

農家3では種いものを保存し、分割された圃場で異なる品種を栽培し、GMジャガイモも栽培しているため、調査されたすべての農家の中では混入の可能性がもっとも高いと思われる。それでも混入レベルは1%を十分に下まわると推定される。ここに示した変更案に従えば、さらに低い混入レベルを達成できるが、0.1%を下まわらざるレベルは達成できない。

3.3.9 農家4：有機栽培による調理用早生ジャガイモの生産

農家4の混入レベルは、おもに種いもの純度と圃場の自生ジャガイモの数とに左右される。種いものは有機農業での使用のために認証され、あるいは農家の隔離圃場で生産されているため、このレベルをさらに下げられる可能性はないであろう。自生ジャガイモの問題は、農家2のときと同様、輪作の周期がすでに十分に長いため、解決が難しい。ある種の耕作(牧草地など)は、浅耕による自生ジャガイモの抑制に都合がよい。考えられる解決法の一つは、休閑あるいは機械除草が可能な植物の導入である。

農家4での推定混入レベルは表34に要約されている。農家4では農家3と同様に混入レベルは低いと思われるが、推定値は0.16%で、やはり0.1%を上まわっている。分別がすでに行われているため、さらに下げられるのは自生ジャガイモだけであるが、混入レベルの変化はほんのわずかであろう。

3.3.10 農業活動の変更のための諸費用

収穫物履歴管理システムを導入する費用を推定した。500~2500トンのジャガイモを保管できる貯蔵施設の費用は、次のデータ(表35)を使って計算した。

履歴管理システムの年間費用は8,970ユーロと推定される。農家1では、これらの費用は299ユーロ/haで、助成金を加えた売上総利益の約13%(ドイツ)あるいは7%(英国)にあたる。農家3では、費用は598ユーロ/haとさらに高く、助成金を加えた売上総利益の21%(ドイツ)あるいは8%(英国)に相当する。

3.3.11 ジャガイモについての総合的結論

ジャガイモは作物の生物学的特性が異なるため、混入の可能性に関してはナタネやトウモロコシよりもかなり単純な作物であると思われる。おもな問題は自生ジャガイモと収穫後の取扱いに関係している。0.1%の基準値を満たすことは非常に難しいが、混入のレベルは一般に

低い(1%未満)と推定される。生産段階のほとんどに0.01%の混入レベルのベースラインを想定したのでは、0.1%の基準値を満たすことはできない。農業活動の変更案によって混入レベルをさらに下げ、安全マージンを大きくすることはできるだろうが、0.1%の混入レベルを下まわる生産を可能にするほどの効果はないと思われる。

ジャガイモ生産についてはコンピュータ・モデルを利用できなかったため、地区内に10%のGMOがある条件での混入レベルは推定しなかった。一般には、組換え遺伝子を持った自生ジャガイモの可能性、混入種いもの割合、収穫後の作物の取扱いの間の混合は低下し、それによって混入レベルはより低くなると予想される。

表34 各農家における混入レベルの推定*

農家タイプ	農家 1		農家 2		農家 3		農家 4	
	現在	変更**	現在	変更**	現在	変更**	現在	変更**
種いもと種いも生産	0.05 (±0.02)	0.05	0.02	0.02	0.1 (±0.05)	0.05	0.04 (±0.02)	0.04
植付け	0.02	0.02	0	0	0.03	0.03	0.01	0.01
耕作機械	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
他家受粉	0	0	0	0	0	0	0	0
自生ジャガイモ	0.1 (±0.08)	0.01	0.02 (±0.02)	0.01	0.1 (±0.08)	0.01	0.04 (±0.03)	0.01
収穫	0.02	0.02	0.01	0.01	0.1	0.05	0.02	0.02
圃場から農家への輸送	0.02	0.02	0.01	0.01	0.04	0.04	0.01	0.01
貯蔵掃除	0.08 (±0.05)	0.01	0.01	0.01	0.1 (±0.08)	0.05	0.01	0.01
梱包	0.04	0.01	0.01	0.01	0.04	0.02	0.01	0.01
農家からの輸送	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01
予想される合計混入率	0.36% (±0.15%)	0.17%	0.1% (±0.02%)	0.09%	0.54% (±0.21%)	0.28%	0.16% (±0.05%)	0.13%

* 混入レベルは収穫物中のGMジャガイモの%で示す
 ** 本文で説明した対策を実施した場合

表35 ジャガイモ生産におけるトレーサビリティ・システムの推定費用*

設備の種類	費用 (EUR)	耐用年数 (年)	費用/年 (EUR)
箱詰め機	30,500	10	3,050
パレット化 (フロートを含む)	22,000	5	4,400
生産のコンピュータ化	7,600	5	1,520
トレーサビリティの総費用	60,100		8,970

* 貯蔵施設あたり500~2,500トンのジャガイモを貯蔵すると想定
 情報源: 私信、ITCF ITPT

4 非 GM 農産物のモニタリング

4.1 GMO の検出と定量

農作物中の GMO をモニタリングし、GMO の有無とその量を確かめる必要がある。そのためには、遺伝子導入植物中の導入 DNA あるいは発現タンパク質を確実に検出、同定、定量できる分析手法を確立する必要がある。これらの成分は GM 作物と非 GM 作物を識別する重要な要素であるためである。また、信頼度の高い分析手法の開発は表示規則の実施に不可欠である。

この章では、まず最先端の検出・定量技術について詳しく説明し、次に GMO 分析における手法の統一の必要性とそのための手順について調べる。最後に農家レベルでの分析に利用できる現在の技術とその推定費用について述べる。

4.1.1 最先端の検出、定量技術

生の試料の分析には、一般に PCR 法 (ポリメラーゼ連鎖反応法) による DNA 分析が使われる。また、生の試料ではタンパク質の検出も行われ、ELISA 法 (酵素結合免疫吸着検定法) などの免疫学的な検定法が一般に用いられる。加工食品の分析には一般的に PCR 法が用いられている。おもに PCR に基づく遺伝子分析手法の開発がさかんに進められているが、現在の GMO 分析の問題点を解決しうる分析技術もいくつか検討されている。しかし、現在、おもに欧州において、規制順守のための共通的な方法として GMO 検出/分析に広く適用されているのは、いくつかの PCR 手法だけである。

4.1.1.1 DNA 分析の手法

DNA 抽出の手法

DNA 分析における最初の作業は、植物試料からの DNA の抽出である。圃場からサンプルを取って十分にすりつぶし、100mg³⁹⁾から350mg⁴⁰⁾を分取することが、実験室での DNA 抽出手順に適している。DNA を抽出するには多様な方法が利用可能である。現在は、GMO 検出に適した、植物試料および植物由来製品からの

DNA 抽出方法として、おもに次の3つの方法が使われている。CTAB 法 (臭化セチルトリメチルアンモニウムを陽イオン界面活性剤として用いる) DNA 結合シリカカラム法 (さまざまなキットが市販されている) およびこの2つの方法の組合せである。これらの方法では収率は低いが高品質高純度の DNA を得ることができる。

CTAB 法はドイツの食品法 LMBG § 35 (L24.01-1 (1997) ; L23.01.22-1 (1998) ; L25.03.01 (1999)) による GMO 検出の公定法の一部であり、多糖類からの DNA 分離に適している。DNA 結合シリカカラム (市販キットの一つ) の使用はスイスの公定 GMO 検出法で定められているが、多糖類がシリカカラムに結合しやすい傾向があるため分離効率に悪影響を及ぼすという報告もある。

複雑な基質あるいは加工食品からの DNA 抽出はつねに可能なわけではない。これまでに、しょうゆ、大豆精製油⁴¹⁾、GM ジャガイモを原料とする蒸留エタノール⁴²⁾ から、検出可能なレベルの DNA 抽出に失敗したという報告がある。しかし、Hellebrand らは、手法を改善することによって常温圧搾油と精製油から組換え DNA の断片を抽出することに成功している⁴³⁾。Paulito らは、多くの種類の食品やその加工過程から検出可能レベルの DNA の抽出に成功したが、精製した糖と油からの抽出には成功していない⁴⁴⁾。

PCR による検出

PCR を使用することによって GMO からの DNA を検出することができる。PCR の原理は、2つのプライマーに挟まれた特定のターゲット DNA 断片 (fragment) を酵素 (好熱性のポリメラーゼ) を用いて100万倍に増幅する方法によっている⁴⁵⁾。増幅は3つの異なる温度の連続的サイクルによる複数の過程からなり、ターゲットの塩基配列 (sequences) の数がサイクル数に応じて指数的に増大する。サイクルは DNA の量

39) Pietsch K, Waiblinger HU, Brodmann P, Wurz A(1997) Dtsch Lebensm Rundsch 93(2): 35-38

40) Zimmermann A, Luthy J, Pauli U (1998) Z Lebensm Unters Forsch 207: 81-90.

41) Meyer R, Jaccaud E(1997) In: Amado R, Battaglia R(eds) Proceedings 9th European Conference on Food Chemistry. Authenticity and adulteration of food - The analytical approach, vol 1. Interlaken, Switzerland 24-26 September 1997, pp 23-28; Pauli U, Liniger M, Zimmermann A (1998) Z Lebensm Unters Forsch 207: 264-267

42) Hubner P, Studer E, Luthy J (1999) Food Control 10: 353-358

43) Hellebrand M, Nagy M, Morsel JT (1998) Z Lebensm Unters Forsch A 206: 237-242

44) Pauli U, Liniger M, Zimmermann A, Schrott M (2000) Mitt Lebensm Hyg 91: 491-501

45) プライマーは合成オリゴヌクレオチドで、ターゲット塩基の配列を持つ2つの鎖のどちらかと相補的である。

と増幅される断片(単位複製配列(amplicon))の長さに応じて20回から50回繰り返される。

新しい好熱性ポリメラーゼ(Ffu、Pwo、Tma、Tli、Tflなど)が市販されているが、*Taq* および *Ampli Taq* DNAポリメラーゼ(5'-3'エキソヌクレアーゼ活性)が GMO 分析での好熱性ポリメラーゼとして選択される場合がまだ多い。

増幅産物(単位複製配列)の同一性について確認、照合する必要があるが、これはゲル電気泳動法(制限酵素切断のパターンによる)、サザンブロット分析法、増幅産物についての別のPCRサイクルを行う方法(nested PCRともよばれる)およびPCR産物の配列決定(もっとも信頼できるが、この方法を日常的に行う設備のある検査機関はほとんどない)によって実施できる。

PCRの効率はDNAの質と純度によって決まる。DNAの純度はもとの試料中に存在する物質やDNA抽出中に使われた化学薬品などさまざまな混入物によって大きく影響される場合がある。加工食品や特定の農産物の基質から分離されたDNAは品質が悪いことが多く、対象にできる塩基配列はかなり短い(たとえば大豆タンパク製剤やトマト加工食品では100~400塩基対(bp)である)。

あるグループによれば、PCR実験における検出の実用限界は、GMO/非GMOの重量比で0.1%とされている⁴⁶⁾。この値は理論上の検出限界である0.005%の20倍にあたる。適切な実証研究によって裏付けられた検出限界はまだ示されていない。PCRの精度は、GMOや食品の種類、加工の程度によっても左右され、試料中のGMO濃度が低ければ分析の誤差はさらに大きくなるだろう。

GMOの同定のためのPCR手法

PCRを用いたGMOの同定では、分析者は、オリゴヌクレオチド・プライマーを設計するために、ターゲットDNAの両端のヌクレオチドの塩基配列を知っていなければならない。オリゴヌクレオチド・プライマーの選択は、PCR分析の目的によっても異なる。

定期的なスクリーニングの場合は、スクリーニングされるグループに特徴的なターゲット配列に注目する必要がある。カリフラワーモザイクウイルス 35Sプロモータ(P-35S)、*Agrobacterium tumefaciens* nosターミネー

タ(nos3')、neomycin-phosphotransferase II(nptII)のような遺伝子制御領域が、現在、市場に出ているGMOの多くに存在している。GMOのスクリーニング法はスイスとドイツの研究者によって、P-35Sとnos3'の遺伝子領域の検出に基づいて最初に導入された。しかし、承認済みのGMOのいくつかはP-35Sまたはnos3'プライマーでは検出できず、完全なスクリーニングを保証するためにはターゲット配列を追加する必要がある。また、確実な同定を行うためには、たとえば、結合部位と各GMOの導入遺伝要素との間の境界領域(いわゆるエッジ・フラグメント)、あるいは切り縮められた遺伝子バージョンによる特異な塩基配列(すなわち、終止やコドン利用の変更)など、それぞれのGMOに特徴的なターゲット配列に基づいて、プライマーを選択しなければならない。

最近ではスクリーニング法よりも導入遺伝子に特異的な手法の開発が重視されている。GMOの完全かつ包括的なモニタリングおよび検出を保証するには、GMOについて入手しうるすべてのデータ、とくに導入遺伝子とその導入部位に関するデータを、市場での流通が承認されたGM製品だけでなく、世界中で試験栽培が行われているほかのGMOについても継続的に調査する必要がある。EU内部では、関連情報の少なくとも一部を提供するデータベースを確立する作業がすでに開始されている⁴⁷⁾。これらの取組みは、欧州委員会共同研究センター(JRC)のプロジェクト「指令90/220/EECのもとで必要とされるモニタリングのために設計されたデータベースと付随する生命情報工学ツールからなるGMO目録の開発」(担当者: Guy Van den Eede)の中で継続、拡大される予定である。

GMOの定量のためのPCR法

GMOの定量は通常のPCR法では行えない。定量的競合PCR(QC-PCR)法およびリアルタイムPCR法などの、PCR法を基礎とする他の手法が、ターゲットDNAの濃度とPCRによって生成される増幅産物の量との関係を明らかにするために開発されている。

PCR法から量的な情報を得るための分析方法は2つのグループに分けられる。定量的競合PCR(QC-PCR)法およびダブルQC-PCR法は、反応効率(E)の低下

46) Jankiewicz A, Broll H, Zagon J (1999) Eur Food Res Techno 1 209 (2): 77-82

47) DMIF-GEN (1999) Development of methods to identify foods produced by means of genetic engineering(遺伝子工学によって作られた食品の同定手法の開発) EU-Project SMT 4-CT 96-2072. DMIF-GEN Final Report, 15 December 1999

を補正するために内部標準と分析対象の共増幅を利用する方法である。内部標準とターゲット DNA の増幅量を比較すると、PCR にかげられたターゲット DNA の増幅開始時のコピー数が推定できる。PCR-ELISA 法およびリアルタイム PCR 法は、反応効率がまだ一定で、生成物濃度が開始時のターゲット分子の濃度と高い相関をもつ、反応の初期段階での PCR 増幅量を測定する方法である。

混合物中の GMO 濃度を推定するため、GMO の DNA の量は植物特有の基準 DNA の量で標準化される。したがって、GMO 濃度は非 GMO 成分とのゲノム/ゲノム比 (g/g) または重量/重量 (w/w) 比として表される。

最近、GMO 濃度をどう表すべきかについて激しい論争が行われている。現在の議論はやや理論的なものである。基準となる検査機関において試料中の DNA 濃度をまず測定し、次に同量の DNA を使って GMO 特有の配列と作物特有の配列のコピーの数を測定する。ゲノムあたりのコピーの予測数を考慮して、両者の比率によって GMO の混入率 (g/g) が算出される。この手法に反対する専門家は、DNA の定量は非常に難しく、またこのような手法では相対的な値しか得られないと主張している。だが、今のところはゲノム/ゲノム比に代わる他の妥当な手法は提案されていない。ゲノム/ゲノム比は DNA の重量比と等しいとみなされることがよくあるが、作物の DNA サイズは一定ではなく、各品種の間で 25% も変動することがあるため、この仮定は簡略化しすぎであろう。

リアルタイム PCR は、精度と特異性を改良した定量的な PCR 法であり、完全にリアルタイムの PCR 装置と使いやすい PCR 検査法の採用によって急速に普及している。リアルタイム PCR 法のもっとも一般的な検査法の一つは Taqman[®] 法、あるいは、5'-エキソヌクレアーゼ (exonuclease) 法といわれるもので、蛍光プローブ (TaqMan[®] プローブ) を使用する方法である。PCR プライマーと TaqMan[®] プローブがともにターゲット DNA に結合した場合に限って蛍光が発生する仕組みが開発されたため、リアルタイム PCR による検出の特異性は通常の PCR よりもかなり高い。ターゲット遺伝子の相対量は、既知量の内生遺伝子を追加して得た標準曲

線を使い、線形回帰によって推定することができる。

リアルタイム PCR 機器の市販台数の伸びは、この技術が成功していることを示している。現在、リアルタイム PCR は多様な農産物と食品の GMO の検出と定量的なためのもっとも強力な手段であると思われる。

リアルタイム PCR においては、生成物合成を間接的にモニタリングすることで、全反応期間中のターゲット DNA 配列の増幅を追うことができる。したがって、従来の PCR を、その強度が直接的に増幅生成物の量に関係するような、つねに測定可能な信号を発生するように改良する必要がある。リアルタイム検出の戦略は PCR の間に発生する蛍光の増加の連続測定をもとにしている。

リアルタイム PCR 法は、さまざまな食品原料の GM 成分の定量に使われている。また、GMO と非 GMO 内部標準の定量が 1 本の試験管の中で行える (マルチプレックス PCR)。マルチプレックス PCR 法によって、変動の影響は小さくなり誤った検出が減少する。増幅と検出が一つの閉じられた試験管の中で 1 段階で行われるため、PCR 増幅の際の相互汚染 (cross-contamination) の危険性は最小限になる。それでも DNA 抽出の際の汚染の危険性をなくすことはできない。

正確な定量が可能になること以外に、リアルタイム PCR 法が有利な点は、PCR 後の解析がデータ処理だけであるため、一定時間で処理できる試料数が他の定量手法よりも多いことである。内部基準遺伝子を使ったマルチプレックス PCR によってリアルタイム PCR の正確さ、精度、処理数は向上するであろうが、リアルタイムの操作手順と方式 (データ処理を含む) について、さらに総合的な評価を早い時期に、できれば検査機関相互の連絡試験 (4.1.2.3 を参照) によって実施する必要もある。

PCR 定量の限界

PCR 法による定量の限界を推定することができる。GMO が二項分布を示すと想定すると、95% の信頼度で 1% 以下 ($\pm 20\%$) の GMO を検出するためには、299 粒のトウモロコシが必要である⁴⁸⁾。

しかし、DNA 抽出の操作の間に、DNA 増幅に使う最終反応混合物の中にあるゲノムコピーの総数が限界粒

48) Ryman N (1999) Statistical assessment of the proportion of GM grains in bulk consignment (ばら荷中の GM トウモロコシの実の比率の統計学的調査) EU-Project No. B 4-3040/98/000272/MAR/E 2. Final report, 16 June 1999

数(たとえば1%の限界値でPCRスクリーニングを行うためにはトウモロコシ299粒が必要)を下まわってしまうことがしばしば起こる。このような場合には、実験の開始時と終了時での試料のサイズの関係は失われてしまう。

KayとVan den Eede⁴⁹⁾は、最近の論文で検出限界について議論している。植物ゲノムに関しては、ある植物個体の複製されていない半数体核ゲノムのDNA量は、C値とよばれている。小麦(*Triticum aestivum*)と大豆(*Glycine max*)の1C値は、それぞれ17.352pg(10^{-12} g)(16.978Mb(100万塩基))と1.25pg(931Mb)である。これらの1C値に基づくと、100ng(10^{-9} g)のDNA(PCRで一般的に使われる量である)には、大豆ゲノムで 8×10^4 コピー、トウモロコシゲノムで 3.8×10^4 コピー、小麦ゲノムでは 5.8×10^4 コピーが含まれているだろう。このことは、もしも100ngのDNAの0.1%だけがGMO由来であったとすると、大豆では80ゲノムコピー、トウモロコシでは38ゲノムコピー、小麦では5ゲノムコピーしか存在しないことになる。その結果、100ngのDNAを反応に用いた場合の、理論上の検出限界(複製されていない半数体核ゲノムのコピー1個に相当)は、大豆、トウモロコシ、小麦に対してそれぞれ0.001%、0.003%、0.02%である。この試料サイズ(100ngのDNA)では、上の限界値より低いDNA量は確実に検出できない。可能であれば、1回の分析の反応量と分析の回数どちらか、あるいは両方を増やすべきである。

品種同定のためのPCR法

DNAマーカーを用いた植物や動物のゲノムの解析は、DNA鑑定(DNA fingerprinting)による植物や動物の品種の識別など、多くの実用技術に利用されている。品種のDNA鑑定には、これまで、制限酵素切断片長多型(RFLP)、任意増幅DNA多型(RAPD)、マイクロサテライトあるいは単純反復配列(SSR)および増幅断片長多型(AFLP)の4種の基本手法が使われている。これらの方法にはそれぞれ長所があり、また特有の短所もある。

RFLP法は、サザンブロット法を利用し、他の手法よりも対立遺伝子の検出が少ない、手間のかかる手法である。RAPD法は、反応条件に敏感であり、再現性に問

題がある。マイクロサテライト法も、多型性については高速な処理が可能であるが、隣接するヌクレオチドの塩基配列の情報を得るには、クローニングと配列決定(sequencing)を含む長時間の調査が必要である。AFLP法は、上記の手法のが持つ欠点のいくつかを解決し、植物ゲノムの研究者の間で急速に普及している。AFLP法では、制限断片(restriction fragments)長の違いではなく、制限断片の「有無」を検出する。AFLP法によって、加工された植物性素材からでさえも、植物を識別できることが示されている。

興味深いことに、AFLP法は、品種の遺伝子型の同定とごく低いレベルのGM成分のモニタリングとを同時に実施できる可能性がある手法として研究されてきた。最近の実験の結果から、AFLP技術は、隣接するゲノム領域に対するAFLPプライマーとともにGMOに対するプライマーを使うことで、遺伝子組換えの検出に利用できることが明らかになった⁵⁰⁾。

RFLPとRAPDの技術を組み合わせたAFLP法は民間企業によって開発された。以前に開発された技術に対しても、AFLP法は多くの利点を持っている。AFLP法によって多くの情報量を得ることができるが、複雑な作業手順が必要であり、分析費用が高く、さらに放射性物質の使用を必要とする。

4.1.1.2 タンパク質分析の手法

導入遺伝子によって合成されたタンパク質の特異的検出は、GMOの同定のもう一つの手段である。しかし、遺伝子組換えは必ずしも新たなタンパク質の産生のために行われるとは限らない。さらに、あるタンパク質はごく低い濃度で植物の特定の部位にだけ発現したり、あるいはさまざまな部位や生理的な発達の各段階ごとに異なった濃度で発現したりするため、分析を難しくしている。植物における導入タンパク質の発現レベルは全可溶性タンパク質の0~2%の範囲であるという報告がある。しかし、ほとんどの場合、報告される発現レベル(たとえば承認されたGM作物での発現レベル)は、上限の2%よりはるかに低い。

タンパク質の検出法は、おもにイムノアッセイ法(免疫学的検定法)に基づいており、これらの方法には完全な3次構造あるいは4次構造が必要であるため、分析で

49) Kay S and Van den Eede G (2001) Nature Biotechnology 19, 5 : 405

50) DMIF-GEN (1999) Development of methods to identify foods produced by means of genetic engineering(遺伝子工学によって作られた食品の同定手法の開発) EU-Project SMT 4-CT 96-2072. DMIF-GEN Final Report, 15 December 1999

きる試料は生で未加工のものにほぼ限られる。

イムノアッセイ法は検査試薬として抗体を使用する分析測定システムである。抗体は、動物の血清中で外部からの物質(抗原)に反応して作られたタンパク質であり、その生成を誘発した抗原と特異的に結合する。GMOの検出の場合には、新たに合成されたタンパク質を抗原とすることができる。免疫学的検出法の開発のためには、検出しようとするタンパク質に高い特異性のある抗体を得ることが不可欠である。それに加えて、分析試料あるいは対象タンパク質は著しく分解・変性してはならない。

イムノアッセイ法のもっとも一般的なタイプは酵素結合免疫吸着検定(ELISA)法である。ELISA法では、酵素を結合した(ラベルした)免疫反応物(抗原または抗体)と免疫吸着剤(固相支持体に結合した抗原または抗体)を用いる。未知濃度の抗原を測定するには、種々の方法(競争的結合法など)が利用できる。

イムノアッセイに基づく、いくつかの手法(おもにELISA法)が、neomysin phosphotransferase II(nptII)(酵素)、5-pyruvylshikimate-3-phosphate synthase(EPSPS)(酵素)、*Bacillus thuringiensis*(Bt)殺虫成分Cry1Ab、および除草剤耐性 phosphinotricin acetyltransferase(PAT)タンパクなど、遺伝子組換え植物中に広く発現する遺伝子産物に対して特異性を持つ手法として開発された。Rondup Ready大豆のタンパク質CP4-EPSPSを特異的に検出するダイレクトサンドイッチELISA法も、LippとAnklamによって検討され、検証された⁵¹⁾。予備実験の結果によると、この方法(市販のELISAキットを利用)によって、0.3%から5%の範囲の濃度で、生大豆試料中のGMOの存在を検出することができる。Bt Cry1Ab、Cry1Ac、Cry1C、Cry9C、EPSPS、PATなど、食用作物中の特定のタンパク質を検出できるキットが新たに開発された。しかし、作物の品種によってタンパク質の発現レベルは異なっているかもしれない。さらに、Cryタンパク質の定量は、EPSPSが全植物種に自然状態でも発現すること、また、多くの異なるCryタンパク質が遺伝子組換えに使われていることから、さらに難しい課題となっている。GMOの検出に使われるELISA法は処理が単純であるため、高度の自動化と試料処理効率が可能になっている。

Lateral Flow Strip検査法は、ELISA法を圃場用に改良したもので、ニトロセルロースストリップに固定した対象タンパク質に特異的な抗体を使用する。最近開発された市販キットは、Cry1Ab、Cry1Ac、Cry9Cなど特定のタンパク質を検出でき、広く使用されている。Lateral Flow Strip検査法は、簡単な実験装置を使った屋外検査によって、かなり実用性のある定性的検査が行える。

免疫化学的検定法の大きな欠点の一つは、加工された植物性製品や食品のような複雑な素材の場合は、精度が落ちる可能性があることである。実際に、界面活性物質(サポニン)、フェノール化合物、脂肪酸、内生フォスファターゼ、あるいは酵素など、抽出液中に存在する多くの物質が、特定の抗原抗体反応を妨害することがある。その上、導入遺伝子によるタンパク質の発現量が非常に低い場合や、熱処理によってタンパク質が分解したり変成したりしている場合は、検出の能力が低下することがある。また、新たに発現したタンパク質はその植物の組織中に均一には存在していないことがある。たとえば、トウモロコシでは、いくつかのタンパク質の高い発現値はほとんど葉だけで観察され、子実では観察されない。最後に、市販の抗体は、対象とするタンパク質に対して低い結合親和性(binding affinity)しか示さないことがある。

4.1.1.3 GMO分析のための他の技術

DNA解析のためのマイクロファブリケート部品とマイクロチップは、将来、新たな多数の遺伝子や遺伝学的調節領域を持つGM植物の迅速な開発に対応するための手段を、GMO分析者に提供できると思われる、有望な技術である。チップを使用したマイクロシステム(マイクロアレイなど)とマイクロ流体工学(microfluidic)システムを融合した新しい技術⁵²⁾は、GMO分析への応用に有望な領域と思われる。しかしGMO分析のためのPCR手順は、増幅時エラー、望ましくないPCR人工産物、偽陰性によっていまだに影響を受けている。

「DNAチップ」として一般的に知られているDNAのマイクロアレイは、発現分析、多型検出、DNA配列決定および遺伝子型分析に利用でき、1枚のスライドガラス上の微小な領域にある数千の核酸を同時に分析できる。マイクロアレイシステムは高い精度と再現性を維持

51) Lipp M, Anklam E (2000) J AOAC Int 83(4): 919-927

52) Sanders GWH, Manz A (2000) Trends in Analytical Chemistry 19: 364-378

しながら時間と経費を節約することができる。マイクロ流体工学システムは、反応から分離、分析まで適用することができ、最終的には、試料の採取と前処理を含む分析すべてを実行するマイクロ総合分析システム(mTAS)の開発につながるかもしれない。

PCR マイクロシステム(「ポータブル・システム」)もまた、DNA 分析へのマイクロチップのまだ数少ない応用例として開発された技術であるが、GMO 分析の分野に多くの展望を与えるものである。「MATCI リアルタイム定量 PCR」など小型 PCR システムの実例が開発されている⁵³⁾。マイクロ PCR ポータブル・システムを利用すると、圃場で作物病を検出したり、あるいは現場での GMO スクリーニングを、たとえば流通の初期段階で実施したりすることが、高額な実験室設備を持たなくても可能になると思われる。

バイオセンサー技術や走査 DNA アレイ検出(Scanometric DNA array detection)に利用される、表面プラズモン共鳴(Surface Plasmon Resonance (SPR))など、GMO 分析のための他のマイクロテクノロジー手法が開発中である。これらの利点は、応答時間が速く、使いやすく、経費が安いことである。

ナノスケール GMO 分析

フローサイトメーターやマイクロマニピュレーション(顕微操作)で分離した細胞からは、PCR 検出に十分な量の DNA が得られるが、単一コピー遺伝子の増幅はかなり困難な課題である。単分子検出(Single Molecule Detection (SMD))は、個々の分子の生化学的反応における化学的、物理的な特性をリアルタイムでモニタリングする方法であり、分析技術分野の最先端の技術である。SMD は、最近、蛍光寿命によって DNA 配列中の 4 つのヌクレオチドを識別することができる超高速 DNA シーケンサーに応用された。この DNA 配列決定法は、1 秒間に多くのヌクレオチドを切り離すエキソヌクレアーゼを利用するため、非常に長い DNA 鎖を高速で配列決定できるなど、従来のシーケンス技術にはない、いくつかの利点があると考えられている。

SMD は、マイクロリットル未満の極微量の液体中の

単分子を数え上げることによって微量の DNA を検出、直接定量する技術を可能にして、「ナノスケール GMO 分析」技術の開発につながると思われる。

4.1.2 統一的な手法の必要性

この節では、サンプリング、試料準備、および結果の解釈に関する基準を策定する際に考慮すべき点を述べ、また、PCR 法と免疫学的検定法の検証の手順についても述べる。

4.1.2.1 サンプリング

サンプルの採取と調整は GMO 分析手順の中で重要な作業であり、とくにサンプル・サイズは非常に重要である。サンプルは、調査対象の生産物のバッチあるいはロットを代表するものでなければならない、また、採取計画とサンプル・サイズは、検査結果が信頼できるだけの均質性と限界値に関する統計学的な条件を満たしていなければならない。サンプリング法、サンプル・サイズ、均質化は、分析の対象とする材料のタイプごとに定められた手順に従わなければならない。

採取しなければならないサンプルの点数と適切なサンプル・サイズは、1 つのサンプルでの均質性の程度と、実際に目標とする GMO 混入の限界値によって決まる。たとえば、トウモロコシでは、299 粒からなる 1 つのサンプルで混入がないという結果が得られた場合、95% の信頼度で、1% 未満という限界値を保証できるが、限界値が 0.1% の場合には、サンプル・サイズは 10 倍以上(3000 粒)にする必要がある。サンプルのサイズについては議論の対象となっており、いくつかの異なるサンプル・サイズが提案されている⁵⁴⁾。サンプル・サイズが異なっているのは、前提条件と適用可能なサンプリング戦略の改善の程度が異なることを反映している。

実験室サンプル(圃場サンプルから抽出した DNA)にも注意が必要である。分析システムの検出限界の下限は、DNA コピーの未利用の反応とランダムサンプリングの統計学的な性質によって決まっている。分析に使うサンプルを採取する際には、検出限界、サンプリング誤差、分析サンプルの希釈操作で生じるエラー等の問題を

53) Belgrader P, Benett W, Hadley D, Richards J, Statton P, Mariella R Jr, Milanovich F (1999) Science 284: 449-50; Belgrader P, Smith JK, Weedn VW, Northrup MA (1998) J Forensic Sci 43: 315-319

54) Heissenberger A.(2000) Proceedings The European Commission's Joint Research Centre (JRC) and International Life Science Institute (ILSI) Joint Workshop on Method Development in Relation to Regulatory Requirements for the Detection of GMOs in the Food Chain. Brussels, Belgium 11-13 December 2000. In: J AOAC Int, submitted

考慮しなければならない⁵⁵⁾。濃度が低い場合、サンプリング誤差は濃度に逆比例して大きくなる。0.1%のGMO濃度(w/wで表す)を推定するときの分析サンプルの中にあるDNAコピーの数の推定範囲を計算してみると、100ngの分析サンプルの場合、95%信頼区間は、平均値の上下30%よりも広い。さらに、これは純粋なサンプリング誤差であるので、実際の分析システムに不完全な動作があれば、この結果はさらに悪くなるかもしれない。

希釈作業を行う場合は、利用できるコピーの数が非常に限定されてくるため、復元抽出の仮定はもはや有効ではないことに注意しなければならない。結論として、均質化された実験室サンプルから繰り返して取られた分析サンプルでは、GMOと非GMOのコピーの比率は同一ではないという認識がこの分野では不十分である。

4.1.2.2 手法の検証の原理

ある手法によって信頼性と再現性のある結果が得られることを示すためには、その手法を検証する必要がある。検証を実施することによって、各手法を独立して使用できるようになり、異なる検査機関の間で比較可能な結果が得られることになる。

定性的なスクリーニングや定量分析などの分析目的に応じて、異なる検証パラメータを評価しなければならない。さらに、これらの研究は、IUPAC、AOAC、ISOなどの統一国際手順に沿って実施し、適切な数(通常8か所以上)の検査機関が加わらなければならない。

しかし、大規模な共同研究には、かなりの労力と資金が必要であるため、適切な予備試験を経た手法のみについて行うべきである。予備研究の目的は、その手法の能力特性を明確にし、実証試験において評価するパラメータの目標値を設定することである。あるいは、手法の能力の研究が、ある手法(あるいは、一般的には検査キット)の能力がメーカーの主張通りであるかどうかを確認するためにも行われる。一般的に、これらのデータは各機関での、あるいは小規模な検査機関グループでの研究により集められ、推定される精度(検査機関内の標準偏差)、予想される系統誤差(バイアス)、回収率(廃棄された試料に基づく)、適用可能性、分析中の他の物質に

よる妨害、および最適な校正方法などについての情報を得る。この段階で、手法解説書(標準作業手順書)が作られ、正規の実証試験の結果と比較される一連のパラメータ期待値とともに、実際に実証試験研究の参加機関に配布される。

検証パラメータは、想定される用途とその手法の特性(定性的スクリーニング手法か定量手法か)によって異なる。識別やスクリーニングが目的の場合、考慮すべきパラメータは、特異性、感度、検出限界、基質効果/妨害、精度(precision)(並行精度(repeatability)、室内再現精度(intermediate precision)、室間再現精度(reproducibility))および頑健性(robustness)である。定量的な検出システムでは、正確度(accuracy)、定量限界、直線性、使用範囲(working range)、変動係数、および不確実性の数値(measurement of uncertainty)を評価しなければならない。

4.1.2.3 DNA検査手法に関するリング・トライアル(比較試験)と共同研究

GMOの(定性的)検出と(定量的)測定に適した技術としてPCRを採用している食品管理検査機関の数が増えている。生の植物材料あるいは植物性食品からのGMO検出の分析技術として、公定、あるいは承認済みの手法を選定する作業は、その初期段階にある。これまでに実施された試験の概要が最近報告された⁵⁶⁾。実験設計(たとえば、参加機関数、サンプル濃度など)に違いがあり、またデータに直接アクセスできないため、異なる比較試験の結果を評価する際には、注意が必要である。

定性的スクリーニング用の検出手法としてのPCRは、生の大豆材料と大豆レシチンについて、スイス公定法を用いて評価され⁵⁷⁾、また、共同研究センター(JRC)が調整した欧州での2つの比較試験の対象にもなった⁵⁸⁾。その手法は、35Sプロモータとnosターミネータの検出に基づくものである。どちらの場合も結果は良好で、スイスの例では90%の総合精度(overall accuracy)、JRCが調整した欧州の試験では、96%の総合特異性(GMOが存在しないと正しく分類)と93%の総合感度(GMOが存在すると正しく分類)であった。

GMOの特異的検出のための定性的PCR手法は、い

55) Kay S and Van den Eede G (2001) Nature Biotechnology 19, 5: 405

56) Anklam, E., Gadani, F., Heinze, P., Pijnenburg, H., & Van den Eede, G. (2001). Eur. Food Res. Technol. 214(1): 3-26

57) Brodmann P, Eugster A, Hubner P, Meyer R, Pauli U, Vogeli U, Luthy J (1997) Mitt Geb Lebensm Hyg 88: 722-731

58) Lipp M, Anklam E (2000) J AOAC Int 83(4): 919-927; Lipp M, Bluth A, Eyquem F, Kruse L, Schimmel H, van den Eede G, Anklam E (2001) Eur Food Res Technol, 212(4): 497-504

いくつかの比較試験によって評価され、結果は全体として良好だった。ドイツ公定法のための比較試験は、ジャガイモ、大豆、トマトなどの生の材料を用いて特異的 PCR を使った GMO 検出についてのもので、総合精度(試料を正しく検出した検査機関の割合)は97%を上まわることが示された(主要な能力パラメータは未発表)。ドイツの連邦医療消費者保護獣医学研究所(BgVV)の研究では、大豆とトウモロコシを含む加工食品(0%、2%および100%の濃度で精度89%、偽陽性率が高かった)脱脂大豆およびトウモロコシ粉(濃度0.1~2%)について良好な総合精度が得られた。スイスのある研究では、Roundup Ready 大豆の特異的な検出を対象として、96%の総合精度を得ている(濃度は0.1%から1%)。

GMO 含量の決定のための定量的 PCR 手法が、いくつかの比較試験によって評価されている。Roundup Ready[®] 大豆が混じった大豆粉といくつかの市販食品試料を使って、4つの定量的競合 PCR 手法を評価する共同研究では、使用した手法について、良好な相関と、一致した分類が示された⁵⁹⁾。あるドイツの研究では、大豆とトウモロコシのミールを使って半定量的競合 PCR 法の1つ、大豆ミールを使って PCR-ELISA 法の1つを検討した。トウモロコシでは良好な結果が得られたが、大豆では結果は良くなかった。大豆とトウモロコシの生試料を使った二重競合 PCR 法の評価も、JRC の調整のもとで評価された⁶⁰⁾。0%、0.1%、0.5%、1%、2%および5%の GM 大豆試料で、70%を超える総合精度が報告された。0%、0.1%、0.5%および1%の GM トウモロコシ試料でも70%を超えたが、GM トウモロコシの割合が1%を超えると精度が著しく低下した。

4.1.2.4 タンパク質の分析手法に関する比較試験と共同研究

PCR についてと同様、有効性を適切に比較するため、

タンパク質検出に関する検証済みの手法が強く必要とされている。これまでに2つの ELISA キットが共同試験研究によって検証されている。

遺伝子組換え作物である Roundup-Ready[®] 大豆から CP4 EPSPS を検出、定量するための診断用 ELISA キットの能力を、JRC が調整する欧州内比較研究(13の加盟国とスイス、38検査機関)で評価した⁶¹⁾。この検証研究では ELISA 検定による混入状態の誤分類は、2%以上の GMO が存在する試料の1%だけであった。また、このイムノアッセイ法は、良好な並行精度(repeatability)と有望な室間再現精度(reproducibility) および0.35%の GMO 検出限界を示した。

最近行われたもう一つの共同研究(20カ国、40検査機関)では、CRY 1(AB)タンパク質に対する特異的 ELISA 検定によって、Mon810トウモロコシを良好に検出できた。報告された定量値の範囲は0.15%から2.0%で、実験室間再現精度(相対標準偏差)の値は23%を下まわった⁶²⁾。

4.1.2.5 国際的な側面

現在の法令では、食品への表示は、GMO 成分が原料レベルで1%を超える場合に義務付けられている。検査の信頼性を高め、実施要件を完全なものにするため、検証された、国際的に公認された手法の使用が急務となっている。統一され承認された手順による GMO 分析の国際標準化と検証が必要である。欧州のレベルでは、JRC 総局が欧州 GMO 検査機関ネットワークとともに GMO の分析手法の検証に積極的に取り組んでいる。さらに、欧州標準化委員会(CEN)やフランス規格協会(AFNOR)など、いくつかの標準化団体が、サンプリング方法と GMO 検出手法の指針の作成に取り組んでいる⁶³⁾。また、国際標準化機構(ISO)は、分析手法を含む基準の統一と資格認定業務を実施している。

59) Hubner P, Studer E, Luthy J (1999) Food Control 10 : 353-358

60) van den Eede G, Lipp M, Eyquem F, Anklam E (2000) Validation of a double competitive polymerase chain reaction method for the quantification of GMOs in raw materials(生素材中の GMO 定量のための二重競合 PCR 手法の検証) EUR 19676 EN, European Commission Joint Research Centre, Institute for Health and Consumer Protection, Food Products and Consumer Goods Unit, Ispra, Italy

61) Lipp M, Anklam E (2000) J AOAC Int 83(4) : 919-927

62) Stave JW, Magin EM, Schimmel H, Lawruk T, Wehling P, Bridges AR (2000) Cereal Foods World 45 : 497-501

63) Heissenberger A (2000) Proceedings The European Commission's Joint Research Centre (JRC) and International Life Science Institute (ILSI) Joint Workshop on Method Development in Relation to Regulatory Requirements for the Detection of GMOs in the Food Chain. Brussels, Belgium 11-13 December 2000. In: J AOAC Int, submitted; AFNOR (2000) Food-stuffs - Detection and quantification of genetically modified vegetal organisms and derived products - Part 1 - Guidelines and requirements. Association Française de Normalisation, Paris France

4.1.2.6 技能試験

検証済みの分析手法による結果が正しいことを証明するため、管理検査機関は技能試験プログラムに参加しなければならない。また、これは認定のための重要なステップでもある。技能試験プログラムでは、検証研究とは異なり、結果を出すためにどの手法を使うかは指定されない。定量分析能力だけでなく定性的な結果を評価するため、さまざまな試験方式が考案されている。技能試験は各検査機関（とくに公的管理検査機関）に対して計画的に行われるようになってきている。これまで、欧州で公式に報告された GMO 検出の技能試験は、英国の環境食料農村省（DEFRA、以前の農業食料水産省）および食品基準庁（FSA）の 5 件のみである⁶⁴⁾。

4.1.2.7 標準サンプルと対照

どのような分析手順においても標準サンプルは不可欠である。これらは認証標準サンプルでも、あるいは DNA 標品などの内部標準でもよい⁶⁵⁾。Roundup Ready 大豆、BT-176 トウモロコシ、Bt-11 トウモロコシなど、食品中の GMO を検出する PCR スクリーニング手法を検証するための認証標準サンプルを、共同研究センター総局の基準物質・計測研究所（Institute for Reference Materials and Measurements）が供給している。認証標準物質は PCR スクリーニング法の検証の証明に使われる。検証の手順は、共同研究センターの環境研究所（Environment Institute）によって調整され、22 の検査機関で、4 種類の認証標準物質を含む 352 点の未知の無作為に配布されたサンプルが分析された。さらに比重調整されたサンプルも利用できる。試験用物質の作成中に DNA あるいはタンパク質が劣化して、DNA やタンパク質による GMO の定量が影響を受けることがあることに注意しなければならない。

もっとも適切な陽性標準物質あるいは陽性対照は何かを決定することは難しい。承認された GMO 系統の場合でも、商業栽培されている品種の遺伝子構成と一致しないことが考えられる。一方、その商業栽培品種を考慮するとしても、正確な遺伝子構成を知ることができない。

検証の手法を作成する際に考慮すべきもう一つの面は、もっとも適切な陰性対照の選択である。分析手法の

「真の」陰性対照は、細胞形質転換の際に実験室で使われた親生物だけであろう。すなわち、形質転換の過程で使われた細胞（protoplasts）の一部から作物を再生し、その作物から陰性標準物質を作らなければならないのである。

最後に、「認証品種」と「栽培品種」との間には大きな生物学的相違が存在する。このような生物学的相違があると、分子レベルでも大きな違いがあると考えられ、遺伝子コピー数の測定による量の算出において問題が発生する可能性があるだろう。同様に、手法開発と分析のための標準物質の選択には特別な注意が必要である。

4.1.3 農家ででの分析に利用できる現在の技術と推定費用

現在利用可能な GMO 分析手法とそれらの経費について以下に示す。

タンパク質検出手法は、現場管理に広く利用されており、おもに ELISA 法と Lateral Flow Strips 法が使われている。イムノアッセイ検査による組換えタンパク質の検出によって、穀粒、葉あるいは他の未加工食品（タンパク質の無傷の三次・四次構造が必要なため）への GM 混入の有無が、現場で容易にスクリーニングできる。このため、この検査は加工工程の初期段階に実施しなければならない。

新しく開発された市販キットが広く使われており、トウモロコシ、ワタ、大豆、ナタネの中の特定のタンパク質（Cry 1 Ab、Cry 1 Ac、Cry 9 C、npt II、5-pyruvylshikimate、EPSPS、Roundup Ready 大豆中の CP 4-EPSPS など）を検出できる⁶⁶⁾。いくつかの Bt エンドトキシン・タンパク質は、穀粒中には非常に低濃度しか発現しないか、あるいはまったく発現しないため、ELISA 法では検出できない（Bt176 トウモロコシ中の Cry 1 Ab）。

ELISA 法は PCR による検査より安価で、実施が簡単である。やや特殊な機器と訓練とが必要であり、一般には、生の分析材料が民間の検査施設に送られる。ELISA 法によって得られる結果は定性的か、半定量的なものである。分析結果は試料提出後 2 ~ 4 日以内に得られる。

64) Howell, M (2000) Proceedings of the Joint AOAC conference on Genetically Modified Organisms in the food chain, Munich, 17-18 May 2000; FAPAS (2000) Report No. 2301 (Series 23, Round 01). Central Science Laboratory, MAFF, London

65) Pauwels J, Kramer GN, Schimmel H, Anklam E, Lipp M, Brodmann P (1999 a, b) <http://www.irmm.jrc.be/rm/irmm-410.pdf>, <http://www.irmm.jrc.be/rm/irmm-411.pdf>

66) Lipp and Anklam (2000) J AOAC Int 83(4): 919-927

Lateral Flow Strip 検査は、安価で、訓練の必要がほとんどなく、高度な実験室設備が不要であるため普及している。この検査によって GMO が存在するかどうかの定性的な結果を10~20分間で得ることができ、農業現場での迅速検査に非常に有用である。

PCR 法を用いて定性的、半定量的、定量的な分析結果を得ることができる。PCR 法では、極微量の DNA しか存在しない場合でも GMO の定量が可能である。PCR を使用した分析試験は、生の材料や種子など農業生産のどの段階でも実施できる。PCR の感度は Lateral Flow Strip 検査の100倍、ELISA 法の10倍と推定される。

現在、欧州で GM 混入を分析するために使われている手法は、この PCR 法である。この手法は非常に感度が高いが、不注意による混入を原因とする偽陽性反応に注意しなければならない。PCR による GMO 検査業務を行っている検査機関は、PCR を用いた GMO の検出と定量のための高精度で信頼性のある手法を開発するためのさまざまな技能試験計画(4.1.2.6を参照)に参加している。

PCR はタンパク質の検出による手法よりも費用がかかり、制御された実験室条件で実施しなければならず、また専門的な機器と訓練が必要である。検査用のサンプルを検査施設に送り、5~10日後に結果が得られる。

適切なサンプリングの手順は、GMO 解析の信頼性を確保するために非常に重要である。2つの非常に重要なサンプリングの時点は、圃場サンプルと分析サンプルである。いくつかの組織が穀粒と種子の代表サンプリングの指針を提供している。ナタネ、トウモロコシおよびジャガイモのサンプリングについてのいくつかの勧告を以下に示す。しかしながら、サンプリング手順に関しては合意と共通化が必要である(4.1.2.1の議論を参照)。

一つの圃場からの代表サンプリングについては、いくつかの組織(GAFTA、ISO)が、ばら荷や袋荷からの穀粒のサンプリングについて指定している。これらのサンプリング手順はよく確立されており、適切なサンプリング頻度の計算はたしかに数学的根拠に基づいている。GMO 検査のためにとくに開発されたものではないが、基礎として利用できる。ばら荷サンプルでは、3キログラムのサンプルが GMO 検査の目的で必要である。袋荷については、袋全体を代表するように、袋の上部、中間部、底部というように異なる部分から分けて取る必要が

ある。

飼料用トウモロコシ子実については、ナタネと同様に、収穫後にサンプルを取ることが推奨されている。適正な農業活動に従っていれば、穀物倉庫に運び込まれたばら荷からサンプルを取って分析することで十分であろう。混入のリスクをすべて避けるには、穀物倉庫に運ばれる前に各荷からサンプリングして検査することも考えられる。

トウモロコシやナタネとは違って、ジャガイモは収穫前にサンプリングができる。統計学的に必要とされるジャガイモの圃場サンプルが非常に多く、また、GM ジャガイモが葉の分析によって検出できるために、圃場から無作為に選んだ1万個体の植物から1枚ずつ葉を採取することが勧められる。あるいは、植え付けられる種いもの各ロットからサンプルを採取することも考えられる。

分析のための代表サンプルとしては、0.1%水準(トウモロコシ1000粒中に1粒の割合)で定量するには、1万粒以上のトウモロコシ子実を採取して細かく砕き、よく混ぜて、1gのDNA抽出用のサンプルを取り出すことが推奨される。1万粒のトウモロコシ子実はおよそ2.5kgにあたる。0.01%水準で統計学的に正しい定量を行うには、サンプルの粒数を10万粒(25kg)まで増やす必要があるが、これは明らかに非現実的である。

ナタネでは、1万粒の種子を細かく砕き、よく混ぜて、1gのサンプルを取り出してDNA抽出に使うことが推奨される。

ジャガイモについては、0.1%の定量水準で GMO を検出することには大きな問題がある。穀粒と同様なやり方では、1万個のいもから取った破片あるいは皮を混ぜ合わせて、DNA抽出用に1gのサブサンプルを取り出すことが統計学的に必要なになる。1回の収穫でのいもの個数と、いもから破片や皮を取るのにかかる時間を考えると、このようなサンプリングは特殊なサンプリング機械がなければ実行不可能である。

GMO 解析の費用について、さまざまな検査機関や企業から得た、商業化された検査に関する利用可能なデータを表36に示す。これらの検査に使用されている手法の検証についてはここでは議論しない。これらの費用は指標にすぎず、基準にはならない。表には分析のタイプ、分析される遺伝子またはタンパク質、検出限界、検査の感度(知られている場合のみ)および適用範囲が示されている。

表36 現在利用できる GMO 解析手法の費用

DNA 分析	価格 EUR/検査	発現/DNA 分析物	検出限界	感度/変動	適用範囲
定性 (検出) PCR	178EUR	CaMV35S、 nos ターミネータ			複雑な混合物中の GMO 検出
	187-158EUR (1-40検定)		0.1%	±20%	欧州あるいは世界中で承認されているすべての GM 作物
定量 PCR	396EUR	Cly 1 Ab、 EPSPS、 ナタネの Bar、 トウモロコシの Bar			
	305-260EUR (1-40検定)		0.1%	±20%	欧州あるいは世界中で承認されているすべての GM 作物
定量リアルタイム PCR	436EUR		0.1%	±20%	欧州あるいは世界中で承認されているすべての GM 作物

タンパク質分析	価格 EUR /検査	発現/ タンパク質分析物	検出限界	感度/変動	適用範囲	推奨される対象品種
ELISA プレート キット	143EUR	Cry 1 Ab Cry 1 Ac	-	2.5%- 0.55%	ばら荷トウモロ コシ子実、ワタ 葉組織	Bt11トウモロコシ ; Bt176トウモロコシの Cry 1 Ab 検出には推奨 しない
	222EUR	Cry 9 C	-	0.05%- 0.25% 0.01%- 0.125%	ばら荷子実	Starlink™
	570EUR	Cry 1 Ab	-	-	-	Mon810トウモロコシ、 Bt11トウモロコシ
	570EUR	Cry 9 C	0.01% 0.01-0.1% 0.1%-1% > 1%	-	-	Aventis 社 Starlink
Lateral Flow 検定	200EUR /50strips	Cry 1 Ab Cry 1 A	1%		ばら荷子実	Bt11トウモロコシ子実
	200EUR /50strips	Cry 9 C	0.1%		ばら荷トウモロ コシ子実	
	912EUR /50strips	Cry 1 Ab	0.1% 1%		現場または実験 室で、 葉、種子、ばら 荷子実	トウモロコシ Mon810、 Bt11Novartis 社、 Novartis 社 KnockOut R、 Mycogen 社 NatureGard R
	912EUR /50strips	Cry 9 C	0.1% 1%		現場または実験 室で、 トウモロコシ子 実、葉、種子、 ばら荷子実	Aventis 社 Starlink R (CBH-351)

表36では、同様な GMO 解析についての価格にばらつきがあるが、これはいくつかの要因で説明できる。たとえば、解析を実施した各検査機関(米国、欧州)が多様である、検査の数や使われる対照が検査機関によって異なる、代表サンプル(生材料か混合食品か)が異なる、各分析の信頼性が異なるなどである。

1 サンプルの定量的 PCR 解析の現在の平均価格は、1 検査あたり320ユーロである。ELISA 法による半定量的解析では、価格は1 検査あたり150ユーロ程度である。もし GMO 成分のモニタリングの実施がもっと頻繁であれば、PCR 解析の価格は著しく低下することが予想される。

4.1.4 結論

植物の遺伝子組換えゲノム科学において予想される技術の進歩が実現すると、バイオテクノロジーによって作られた農産物の導入が、今後10年の間に社会や経済に重大な影響を与えるだろう。GM 農産物が次々に世界市場に入ってくるので、種子の純度を判定したり、供給や流通の経路のすべてにおいて農産物に GMO が混入していないことを立証したりするために、非常に低いレベルの GM 成分のモニタリングと、品種の遺伝子型の同定が必須になるであろう。

開発、品質保証、解禁後の GMO 農業の各段階での、遺伝子組換え形質の効果的なモニタリングは、遺伝子目録と専用情報システムを利用することによって可能になるであろう。JRC は、具体的な遺伝子組換えと適切な同定手法の情報を含む分子目録の開発に努力している。しかしながら、遺伝子目録を活用できるのは、認証基準試料をすぐに入手できる場合に限られる。それは、種子開発者から加工業者、製造業者まで、組み換え作物の開発におけるすべての関係者間の多大な協力によって成し遂げられなければならない。

非常に高い感度と特異性を持っているため、いろいろな種類の PCR 法が、GMO の定性的、定量的な分析に使用される代表的な分析技術になっている。一方、イムノアッセイ法は、同一性保持システムにおいて農産物の状態を現場で迅速にモニタリングする魅力的な手段となってきた。この方法は、専門家でなくても、費用効果の高いやり方で使用できる。

作物品種の開発において、従来の育種手法と新しい分子育種手法を融合することによって、複数の有用遺伝子を持つ、つまり同じ農産物中に複数の分析対象を持つ、さらに多様な GMO が作られるであろう。現在は、これ

らの新たな分析の問題点と課題に適切に対応できる技術はないが、分析デバイスの小型化とそれによる遺伝子解析用のマイクロチップやマイクロ流体システムの導入などによって、大きな可能性が近い将来に実現するかもしれない。

GMO の検査技術の正確性、信頼性および速さはたえず改善されている。しかし、その検査能力はサンプリングの戦略と手順によって大きく左右されることを強調しなければならない。サンプリングの計画は、新たな作物材料や検出成分ごとに十分に評価し、決定するべきである。そのためには、欧州標準化委員会(CEN、ブリュッセル、ベルギー)の技術委員会 CEN/TC275の中にあるワーキンググループ「遺伝子組換え食品原料」(WG11)が開発しているような、国際的に承認された統一サンプリング手順の確立に向けた作業が必要である。

最終的に、供給と流通の経路における GMO 混入の際に予想される経済的影響を考えると、食品や農産物中への GMO 混入の有無の分析には、国際的に検証され、承認された方法と標準試料を使うことがとくに重要と思われる。しかし、公定あるいは認証済みの GMO 検査法の採用は、まだ始まったばかりである。定量的な手法の検証と統一においては、農業生産、出荷、加工の間に従来材料に GMO が非意図的に混入する確率を考慮した、GMO の限界値に従って取り組む必要がある。

4.2 モニタリングシステムの提案

農家のレベルでの GM 作物と非 GM 作物との分別を保証するには、生産過程の最後の生産物の管理が十分ではないだろう。混入を抑制し、ある基準値未満の混入レベルの作物を出荷するには、作物の栽培と収穫後の取扱いの間にいくつかの対策を実施しなければならない。これらの対策の実施はオンラインでモニタリングすべきであり、それによって、これらの対策の有効性が確保でき、また、経費のかかる最終製品の管理をできるだけ避けることができる。

現在の分別およびモニタリングのシステム(有機農法、認証種子生産、SCIMAC 指針、Soja de Pays など)を解析することによって、非 GM 作物中への GM 作物の混入を抑制するためのモニタリングシステムを開発した。このシステムは、よく知られている危害分析重点管理点(HACCP)法に基づいており、これを農家内でのモニタリングの要求に適合させたものである。

4.2.1 HACCP 手法

HACCP 手法は、1960年代に NASA が宇宙飛行士の食物の安全性を確保するために最初に開発し、その後、食品業界で使われてきた。予想される危害の特定と防止に基づく食品の安全性のための予防システムで、コーデックス委員会が開発した国際的に同意された手順がある。けれども、同じ手法が、農業生産システムにおける GMO 含有など任意のプロセスにも適用でき、さまざまな種類の特性の制御に利用できる。

この手法は次の7つの HACCP 原則に従っている。

- 原則 1 . 危害分析を行い、防止手段を決定する
- 原則 2 . 重要管理点 (CCP) を決定する
- 原則 3 . 決定した各 CCP に関連する防止手段の管理基準を設定する
- 原則 4 . CCP のモニタリング要件を設定する
- 原則 5 . モニタリングによって特定の CCP が十分ではないことがわかったときにとらなければならない改善方策を設定する
- 原則 6 . HACCP システムが正しく機能していることを検証するための手順を設定する
- 原則 7 . 以上の原則とその適用のためのすべての手順と記録に関する文書化方法を設定する

HACCP 手法は、品質保証の問題をきわめて体系的に扱う予防システムであり、監督機関の監査の目的ばかりでなく、国際的な基準による品質評価に対しても使用することができる。

農業に適合させた HACCP 手法は、適正な農業活動に基づいている。開発された実施計画では、適切な従業員研修、非 GM 生産品の来歴と状態についての文書化、非 GM 製品の分離の実施、GM が含まれないことを裏付ける検査の記録が要求される。栽培の過程の各時期に、分離を確実にする手順を文書として記録しなければならない。この実施計画では GMO の定性的および定量的 PCR 解析が使われる。

4.2.2 システムの構成

このシステムの立ち上げと維持は、いくつもの異なる段階の集合と考えることができる。最初の段階は計画と設置からなっているが、稼働中のシステムはオンライン・モニタリング活動、GMO のサンプリングと検査、内部点検と外部監査から構成されている。以下に、これらの各手順のそれぞれの内訳を、関連費用とともに示す。3つの異なったレベルの追加モニタリングの必要に合わせ

て、HACCP の3つのバージョンを使ったモニタリングシステムを開発した。これら3つのバージョンの構造は同一であるが、決定された CCP の個数が異なる。そのため、バージョン間の費用の違いはわずかにすぎない。

費用の計算は、次のような想定に基づいている。

- ・費用は、モニタリングシステムの設置と運用に関連する活動に多くにかかわるが、モニタリングシステムは第三者による監査と認証を受けなければならない。機械の清掃など、作物への GMO の混入を防ぐための農業活動の変更に関連する費用については第3章で示しているため、ここには含めない。
- ・実施計画とその運用の大部分は、適正農業活動 (GAP) および GM 作物の生産に関する規制のもとになっている理論的根拠を確認するためのものである。各農家タイプはこれらを十分に満たしているが、いずれも HACCP タイプのシステムを持っていないと想定する。
- ・実施計画によって示されるモニタリングの要件や記録は、まったく新たなものではないが、新たな項目を必要とするものがあり、また現在の記録から実施計画への関連付けが必要になるだろう。
- ・各モデル農家は、記録を管理するための経営情報システム (MIS) をすでに使っている。
- ・一般栽培農家が非 GM 品種と GM 品種の両方を栽培する場合、モニタリング活動は非 GM 作物の生産と GM 作物の生産の両方を扱うと想定する。
- ・従業員の時間給は次のとおりである：

経営者	25.00ユーロ
現場主任	11.20ユーロ
技術者	9.76ユーロ

システムの立案

システムの立案、設置、運用のためには、このシステムに責任がある人々の研修が必要である。小規模なチーム (経営者と2名のスタッフ) がシステムの立案に協力し、さらに、システムの運用を受け持つことになるすべての従業員に対する実務研修と自覚研修を行わなければならない。経験のあるコンサルタントが研修の助言者となり、グループによる確認作業の原案をまとめる際に各農家でグループを指導すると想定する。システムの立案にかかわる費用を表37に示す。この投資は、おもに研修の費用からなり、5年間にわたって有効であると想定する。

表37 モニタリングシステム立案の推定費用

	時間(従事時間)	費用 (EUR)
経営者 1 名、主任 2 名の研修とシステム原案の作成	24	1339.20 (料金960 + 賃金379.20)
グループの編成と実施計画の検証 (経営者 1 名と主任 2 名、1 日)	24	379.20
作業員全員の自覚研修 (スタッフ 5 名と経営者、3 時間)	18	221.40
合 計	66	1939.80
有効期間を 5 年と仮定したときの農家あたり年間費用		388

システムの設置

この段階には、計画を実施に移すことが含まれる。これには、現在行われている活動と記録維持との関連付けをすること、必要な記録システムを考案すること、内部点検の手順を決定することが含まれる。必要な手順と記録のおおよそ90%は、GAP 要件と GMO 規制に対応するため、すでに実施されていると推定される。

設置の段階での必要時間は、経営者が 1 人・日 (200 ユーロ)、主任が 1 人・日 (89.6 ユーロ) と見積もられる。これらの研修への投資は、5 年間有効であると想定する (58 ユーロ / 年・農家)。

オンライン・モニタリング活動

オンライン・モニタリング活動のおもな内容は、採用した対策を文書化することである。システムに関連する費用のほとんど全部が、システムの立案と設置の段階に必要であり、年ごとのオンライン・モニタリング費用はあまり大きくない。これには、モデル農家にはすでに稼働している経営情報システム (MIS) があるという想定が関係している。したがって、新たなモニタリング・システムを立案し、設置し、運用する費用は、既存の MIS について必要と思われるもの以外に必要な、新たな手順の費用に限られる。供給者の査定は、シーズンの最初に供給者となりうるすべての農家について実施され、システムへの記録は一度だけ行われると想定する。必要とされる追加のいくつかは、現在の書式にチェック欄を追加するだけになるであろう。

システムの運営費を大まかにつかむため、現在の MIS の運営との比較を行った。各圃場は同じに扱った、同じ取扱いがされる 5 つの圃場で単一の作物 (ナタネなど)

が栽培される場合に、ある単純な MIS に記録を入力するには、1 年あたりでのべ20時間が必要と思われる。その費用は 1 時間あたり25ユーロとして、年あたり500ユーロと推定される。もっと複雑な農業活動では、さらに時間がかかるだろうが、これらの費用は生産量や作物によっては変化せず、ほぼ一定である。

非常に厳格なモニタリング・システムについては、オンライン・モニタリング活動の費用は農家あたり80ユーロ/年と推定される (3.2時間/年の増加)。中間的なシステムと低レベルのシステムについては、オンライン・モニタリング費用は農家あたり10ユーロ/年と推定される。したがって、現在の代表的な MIS の年間のランニング・コストを500ユーロとすると、オンライン・モニタリングの追加費用は、もっとも厳しいシステムでは年あたり16%にもなり、よりゆるやかな 2 つのシステムでは 2 % にあたる (下の4.2.3を参照)。

サンプリングと GMO 成分の分析

解析に使われるサンプルの数は、その作物の最初の買い手の要求によって異なる。ナタネなど一部の作物では、出荷される各バッチを検査する必要があるかもしれない。「バッチ」の定義は非常に多様であり、一つの圃場、圃場の一部、一つの容器/サイロ/倉庫、農家から出される各種荷などのいずれでもあり得る。ここでは、検査の単位はそれぞれの圃場であると想定する。ある市販されているオンライン・モニタリング・システムでは、このサンプリングの手順は、可能な場合には他の品質特性の解析のためのサンプリングと統合することができるので、GMO 混入の防止のための追加サンプリング費用はかなり低くなると思われる。各作物に対して次の費用を

想定した。

- ・ナタネ 0.5ユーロ/トン
- ・トウモロコシ 0.5ユーロ/トン
- ・ジャガイモ 5ユーロ/ha

ナタネとトウモロコシは収穫後にサンプリングされるため、サンプリング費用の合計は生産量と高い相関がある。したがってその費用はトンあたりで推定される。一方、ジャガイモの場合は、サンプリングは生育中のジャガイモの植物から葉を取ることに伴って、収穫前の圃場で行われる。そのため、サンプリング費用の合計は生産面積と高い相関があり、その費用は面積あたりで推定される。

GMO 混入率を調べる収穫種子検査の費用は、(定量PCR分析について表36に示した現在の価格に基づき、また需要の増加に応じて価格が低下すると仮定して)180ユーロ/検査と想定し、圃場あたり1つのGMO検査が要求されるとする。この想定では各圃場の面積が重要な要因となり、GMO分析の経費に影響する。

混入の確率がわかっている確立されたシステムにおいては、GMO成分の検査(とサンプリング)の頻度は、この圃場面積と生産チェーンの次の段階におけるGM混入の悪影響の大きさによって調節されるだろう。トウモロコシとジャガイモでは、各圃場が1年おきに検査されると想定する。ナタネ生産では、全部または一部が種子生産に使われているため、各圃場が毎年検査されると想定する。

システムの点検

このシステムは、年に一度(あるいは運用に変更があったときはこれより早く)点検を行う必要がある。点検には、経営者が1日かける必要があり、農家あたりの年間200ユーロの費用に相当すると見積もられた。

外部監査

既存のHACCPタイプのシステムを参考にして、外部監査の費用を、1か所1年あたり1件の電話審査の費用85.50ユーロと、480ユーロと推定される農家への立ち入り監査費用とをともに計算する。農家への立ち入り監査は3年ごとに行われることになっているため、訪問に対する年あたりの費用は160ユーロと考えられ、農家あたりの年間費用は245.5ユーロとなる。

4.2.3 異なるレベルのモニタリング要求のための適合

上で示した一般的構成を、3つの異なるバージョンで

ある厳格なシステム、中間的なシステム、および低レベルのシステムを開発するために使用した。3つのバージョンは、新たなモニタリング活動の要求に影響するいくつかのパラメータに基づいて、各農家タイプに適合させている。

- 目標基準値
- 混入の可能性
- ほかの規制や市場要求によって、すでに実施されているモニタリング活動

重要管理点の数が、3つのバージョンの間の主要な違いであり、これだけを費用の推定において考慮した。表38に管理が必要になると思われる作業段階を要約し、3つのバージョン間での違いを示している。

厳格なモニタリングシステム

混入が生じるかもしれないすべての作業を考慮した非常に厳しいシステムは、0.1%の混入という低い許容水準に適しているだろう。このシステムは、有機栽培農家と、できるだけ低いGM混入レベルで一般栽培作物を生産する非有機栽培の農家、また、もっとも低いGM基準値で種子生産を行う農家に適している。この研究では有機栽培農家タイプのすべてに適用した。文書化のシステムに必要な新たな時間は、年あたり3.2時間である。

中間的なモニタリングシステム

中間的なモニタリングシステムは、GMの混入源すべてではなく重要な混入源を決めて、それだけを管理するために開発されている。1%の基準値を守らなければならない一般栽培による生産、あるいは、0.3%の基準値を守らなければならない種子生産者に適しているだろう。対象とした農家タイプのうち、ナタネ(種子)、トウモロコシ、早生ジャガイモを生産する一般栽培農家には、このモニタリングシステムが適している。このシステムは、販売用や自家利用の種子を生産する農家にも適している。厳格なモニタリングシステムでは重要管理点を28個としているが、中間的なモニタリングシステムでは18個の重要管理点を決めている。おもな違いは、栽培圃場の決定、圃場準備および作物管理に関する管理が少ないことである。収穫と収穫後の作業、播種と植付けについては同程度の管理を行う。オンラインモニタリングの費用は厳格なシステムの時よりも低く、文書化のシステムに必要な新たな時間は、年あたり0.4時間である。

低レベルのモニタリングシステム

適正な農業活動によって混入の確率がすでに適切に抑制されているシステムでは、低いレベルのモニタリングシステムで十分であろう。この状況は、農家が食用に高価値の作物を生産する場合や、農家が、第三者や農家自身の管理システムによる監査を要求される品質保証制度や同一性保持制度に参加することによって付加価値を得ようとする場合には、徐々に一般的な状況になってきている。このシステムはGM混入が起きにくい作物(ジャガイモなど)を生産する農家にもっとも適しているだろう。また、高いレベルの経営管理を実施し、厳格な顧客仕様に合わせて作物を生産している農家にも適している

だろう。この研究では、このモニタリングシステムは一般栽培によるジャガイモ生産農家(農家1)に適用される。この研究で扱われる他の農家タイプは、どれもこのシステムには適さないだろう。他の提案と異なり、この低レベルのシステムでは、重要管理点を9個しか決めていない。認証種子の使用と播種、植栽の作業の管理はこのシステムでも重要である。また収穫と保管の間の非意図的な混合は、サンプリング作業とともに、管理が必要である。このもっとも低度のモニタリングシステムの推定費用の基礎は、ほかの提案で算出されたものと同じ固定費用である。また、オンラインモニタリングの費用は、中間的システムと同じである。

表38A 各レベル(厳格、中間的、低度)のモニタリングシステムでの混入可能性分析の記録

作業段階	混入の可能性	管理手段	重要管理点		
			厳格	中間	低度
1.栽培圃場の決定	近隣のGM作物に極めて近い	別の栽培場所を探す	✓	✓	
	以前の作物のGM残さ	可能性を評価			
	GM自生作物	可能性を評価 - 輪作についての知識を利用	✓		
	輸送経路が近い	可能性を評価 - 新たなサイトを探す	✓		
	雑草と野生植物へのGM混入 - 有機栽培農家に関係	可能性を評価	✓		
	近隣での作付け計画変更	播種時期が近くなならないよう再検討	✓		
2.種子の入手	種子へのGM混入 - 認証種子	認証種子基準 - 試料を保存	✓	✓	✓
	農家保存種子	以前の作物管理によって抑制 - 試料を保存	✓	✓	
3.圃場準備	GM自生作物	耕作/適切な除草剤の散布。 手取り除草 - 有機栽培農家/近隣農家との連携	✓	✓	
	GMが混入した雑草と野生植物	可能性の確認、通常の耕起によって除去	✓		
	機械類 - 請負業者 / - 近隣農家	GAP* - 畑ごとに掃除	✓		
	GMが混入した堆肥 - 有機栽培農家に関係	GM混入がないことを確認	✓		
* GAP: 適正な農業活動					

表38B 各レベル(厳格、中間的、低度)のモニタリングシステムでの混入可能性分析の記録(続き)

作業段階	混入の可能性	管理手段	重要管理点		
			厳格	中間	低度
4.播種/植付け	混入	GAP 非GM作物を最初に播種	✓	✓	✓
	種子の取り違え	GAP 正確な管理記録 + 作業員の熟練	✓	✓	✓
	圃場の取り違え	GAP 正確な管理記録 + 作業員の熟練	✓	✓	✓
	汚れた/共有の機械	GAP 機械の掃除	✓	✓	✓
5.作物管理	汚染した機械 特に開花期	GAP 機械の掃除 - 非GM作物に最初に散布	✓		
	機械 - 請負業者 / - 共有	GAP 同上	✓		
	自生植物	除草剤散布/手除草	✓		
6.収穫と輸送	機械 - 汚染 / - 請負業者 / - 共有	GAP 機械の掃除	✓	✓	✓
	混載	GAP	✓	✓	✓
	障壁作物の収穫	別々に収穫	✓	✓	
	積荷への混入	必要に応じて覆いかけ - 有機栽培農家	✓	✓	
7.農家貯蔵	GM/非GMの混合	GAP 管理コミュニケーション	✓	✓	✓
	汚れた設備/施設	GAP	✓	✓	
	害獣/鳥による運搬	GAP	✓	✓	
	作業員(衣類/はきもの)	GAP	✓	✓	
	不正確な記録/識別	GAP 記録/ラベル付け	✓	✓	
	不正確なサンプリング	認められた実施手順によるサンプリング	✓	✓	✓
* GAP : 適正な農業活動					

4.2.4 モニタリングシステムの合計費用 - 固定費用

モニタリングの構成の提案の概説で示されているように、費用の大きな部分は農家レベルでの固定費用である。モニタリングシステムを立案、設定する初期活動の年間費用に内部点検と外部監査の年間費用を加えると、固定費用の合計は、農家・年あたり892ユーロとなる。これは、小規模な農家にとって、面積あたりでも、生産量あたりでも、非常に高い費用となる。小規模農家が費用効

率を高めるためには、他の小規模農家と協力して生産利益を維持しなければならないだろう。

そのため、モデル作物の面積が10ha未満の農家は、互いに協力して、農家単位で年間の固定費用を共有することによって、面積あたりと生産量あたりの費用を大幅に減らすことができると想定する。モデル作物面積が2ha未満の農家は5農家のグループを形成し、モデル作物面積が10haより小さいが2haより大きな農家は、3農家で

グループを作る。

4.2.5 ナタネについてのモニタリング費用

表39に、ナタネ農家(農家1~3)におけるモニタリングシステムを立ち上げ、運用するための合計費用をまとめています。長期にわたる出荷のすべてについて低いGMO含量を保証するため、生産物が毎年検査される。ここに示す農家の費用の幅は非常に大きい。認証種子生

産農家での費用(107-112ユーロ/ha)は、保存種子を使用する通常の生産農家の場合(31ユーロ/ha)よりも、かなり高い。面積あたりの費用の違いを決定するもっとも重要な要因はその作物の栽培面積である。農家1と農家2はナタネの生産に12haしか使っていないが、農家3の作物栽培面積(70ha)はその6倍近くも大きく、面積あたりの費用は非常に低くなっている。

表39 ナタネ種子生産農家(1-3)での総モニタリング費用

ナタネ	農家1 一般栽培 認証種子生産		農家2 有機栽培 認証種子生産		農家3 農家保存種子による 一般栽培生産	
	EUR/ha	EUR/t	EUR/ha	EUR/t	EUR/ha	EUR/t
栽培面積(ha)	12		12		70	
圃場サイズ(ha)	6		6		11	
収量(トン/ha)	3.5		2.3		3.14	
モニタリングシステム	中間		厳格		中間	
GMO検査の頻度 (回/圃場・年)	1		1		1	
	EUR/ha	EUR/t	EUR/ha	EUR/t	EUR/ha	EUR/t
立案	32.3	9.2	32.3	14.1	5.5	1.8
設置	4.8	1.4	4.8	2.1	0.8	0.2
オンラインモニタリング	0.8	0.2	6.7	2.9	0.1	0.1
サンプリング	1.7	0.5	1.1	0.5	1.5	0.5
GMO分析	30.0	8.6	30.0	13.0	16.4	5.2
内部点検	16.7	4.8	16.7	7.2	2.9	0.9
外部監査	20.5	5.8	20.5	8.9	3.5	1.1
総費用	107	30.5	112	48.7	31	9.8

認証種子生産においては、もっとも厳しいモニタリングシステムを実施した有機栽培農家2の費用は、中間的なシステムを採用した一般栽培農家1よりわずかに高い。その違いは、農家2の年あたりのオンラインモニタリングの費用6.7ユーロ/haが農家1の費用0.8ユーロ/haよりも高いことによる。一方、有機栽培農家2は面積あたりのサンプリング費用が低い。これは収量が低いためであり、生産量あたりのサンプリング費用は同一である。収量が低いことによって生産量あたりの費用は農家1より50%高くなってしまふのである。

表にない2つの農家タイプの費用は図8に示されている

る。農家4は、農家3の有機栽培バージョンであるが、費用は農家3とほとんど同じである。小規模な有機栽培農家2'での費用は、非常に大きく異なる。ナタネ生産面積が1haしかないため、農家レベルの固定費用が合計費用に非常に大きく影響する。農家が同様な農家と協力すると仮定しても、合計費用(439ユーロ/haおよび191ユーロ/トン)は、ここで記述しているようなモニタリングシステムを導入するにはあまりに高すぎる。

4.2.6 トウモロコシについてのモニタリング費用

トウモロコシにおける費用の推定は、ナタネの場合と

同様な仮定に基づいている。システムの立案と実施、さらに内部点検と外部点検の農家あたり年間費用は、システムが開発されるどの農家でも同一であると仮定する。トウモロコシ生産におけるモニタリングシステムの立上げ、運用の合計費用を表40にまとめている。示されている費用の範囲は、一般栽培による集約的生産の46.2ユー

ロ/haから、有機栽培生産の91ユーロ/haまでで、費用の大まかな水準はナタネ生産よりやや低めである。これは、検査が2年ごとに実行されると予想され、また収量が高いために、年間のサンプリング費用と生産量あたりのGMO解析費用が低いことによる。

表40 トウモロコシ子実生産農家(1-3)での総モニタリング費用

トウモロコシ	農家1 一般栽培、 集約的生産		農家2 有機栽培生産		農家3 一般栽培、 非集約的生産	
	EUR/ha	EUR/t	EUR/ha	EUR/t	EUR/ha	EUR/t
栽培面積 (ha)	50		6 (18) *		20	
圃場サイズ (ha)	3.5		3.5		20	
収量 (トン/ha)	10.15		9.0		10.06	
モニタリングシステム	中間		中間		中間	
GMO 検査の頻度 (回/圃場・年)	0.5		0.5		0.5	
	EUR/ha	EUR/t	EUR/ha	EUR/t	EUR/ha	EUR/t
立案	7.8	0.8	21.5	2.4	19.4	1.9
設置	1.2	0.1	3.2	0.4	2.9	0.3
オンラインモニタリング	0.2	0 (0.02)	13.3	1.5	0.5	0.1
サンプリング	2.5	0.2	2.2	0.2	2.4	0.2
GMO 分析	25.7	2.5	25.7	2.9	4.5	0.5
内部点検	4.0	0.4	11.1	1.2	10.0	1.0
外部監査	4.9	0.5	13.6	1.5	12.3	1.2
総費用	46.2	4.5	90.8	10.1	52.0	5.2
* 3農家が協力して農家水準で固定費用を共有すると仮定する。						

ナタネと同様に、作物の面積がモニタリングの合計費用を決定している。農家1は50haでトウモロコシを集約的に一般栽培する生産者であり、モニタリング合計費用は46.2ユーロ/haである。一方、農家2は6haのみでトウモロコシを生産している有機栽培農家であり、費用は農家1の2倍近くかかる。農家3は20haの畑を持つ非集約的な一般栽培農家で、費用は農家1よりわずかに高いだけである。この農家では、生産面積が相対的に小さいために高くつく固定経費が、GMO検査の経費が非常に低いことによって相殺されている。農家3は大きな圃場を1つだけ持つが、農家1はいくつかの小さな圃場を

持っている。そのため、農家3は農家1と比較して面積あたりのGMO検査の点数が少なくなり、面積あたりのGMO検査費用が低い。収量は農家タイプの間であまり差がないので、生産量あたり費用の違いは面積あたりの費用と同じ傾向である。

表にない農家タイプについての費用を図8に示す。農家4は農家3(一般栽培による非集約的な生産)に対応する有機栽培農家である。この2つの農家での費用はよく似ている。農家4で面積あたりの費用がわずかに高いのは、厳格なモニタリングシステムを適用していることがおもな理由である。農家4の収量が低いため、生産量

あたりの費用ではこの違いは大きくなる。農家4'は農家4と同様だが、より小規模な農家である。栽培面積が小さいために(農家3と農家4が20haであるのに対して農家4'は3ha)面積あたりのモニタリング費用が高く、同じ規模の3つの農家が協力すると仮定しても、面積あたりの合計費用は158ユーロ/haとなる。農家2'は農家2をずっと小規模にしたものである。この農家では1haのみでトウモロコシを生産しているためモニタリング費用の共通部分が大きく、モニタリング費用は296ユーロ/haあるいは33ユーロ/トンと非常に高くなる。農家5は農家1に似ているが、トウモロコシの生産面積が小さく(25ha)圃場のサイズが大きい(8ha)。費用は50ユーロ/haあるいは5.3ユーロ/トンである。

4.2.7 ジャガイモについてのモニタリング費用

ナタネとトウモロコシの場合と同じ費用構成を適用する。トウモロコシの場合と同様、各圃場のGMO混入の検査は2年ごとに行われる。サンプリングについては、ジャガイモの葉を収穫前に圃場で採取すると想定する。収穫後のジャガイモのサンプリングは1点のサンプルの重量が大きいため適当ではない。このためジャガイモでの面積あたりサンプリング費用は、ほかのモデル作物よりわずかに高い。面積あたりの合計費用はトウモロコシに対する合計費用と同程度であるが、ジャガイモの収量が高いため生産量あたりの費用は低く、1.0ユーロ/トンから3.4ユーロ/トンの範囲となる。ジャガイモでのモニタリングシステムの合計費用は表41にまとめられている。

表41 ジャガイモ生産農家(1-3)での総モニタリング費用

ジャガイモ	農家1 一般栽培生産		農家2 有機栽培生産		農家3 一般栽培、早期生産	
	EUR/ha	EUR/t	EUR/ha	EUR/t	EUR/ha	EUR/t
栽培面積 (ha)	30		25		15	
圃場サイズ (ha)	10		5		3	
収量 (トン/ha)	41.9		25.1		27.2	
モニタリングシステム	低度		厳格		中間	
GMO 検査の頻度 (回/圃場・年)	0.5		0.5		0.5	
	EUR/ha	EUR/t	EUR/ha	EUR/t	EUR/ha	EUR/t
立案	12.9	0.3	15.5	0.6	25.9	1.0
設置	1.9	0.05	2.3	0.1	3.9	0.1
オンラインモニタリング	0.3	0 (0.01)	3.2	0.1	0.7	0 (0.02)
サンプリング	2.4	0.05	2.4	0.1	2.4	0.1
GMO 分析	9.0	0.2	18.0	0.7	30.0	1.1
内部点検	6.7	0.2	8.0	0.3	13.3	0.5
外部監査	8.2	0.2	9.8	0.4	16.4	0.6
総費用	41.5	1.0	59.3	2.4	92.5	3.4

ほかのモデル作物でも見られるように、ジャガイモの場合も栽培面積が合計費用に大きく影響する。農家1は一般栽培農家で、30haでジャガイモを生産する。費用はもっとも低く、面積あたりの合計費用は41.5ユーロ/haである。その有機栽培バージョンの農家で25haの栽培面積をもつ農家2では、面積あたり合計費用は59.3ユーロ/

haで、農家1より50%近くも高い。この違いのほとんどは圃場面積が小さいためGMO検査の費用が高いことによる。農家3は早生ジャガイモを一般栽培しており、合計費用は92.5ユーロ/haである。他の農家に比べて費用が大きいのは、栽培面積が小さい(15ha)ためである。早生ジャガイモの収量が低いいため、生産量あたりの費用

はさらに高い。

表に含まれていない農家タイプである農家4の費用は、図8の中に示されている。農家4は農家3（一般栽培による早生ジャガイモを生産）の有機栽培バージョンであり、2つの農家の費用はよく似ている。唯一の違いは、面積あたりのオンラインモニタリング費用が農家4では高いことであるが、これはもっとも厳しいモニタリングシステムを採用しているためである。農家4の収量が低いため、生産量あたりの費用ではこの違いがさらに大きくなる(農家3が3.4ユーロ/トン、農家4が6.0ユーロ/トン)。

4.2.8 結論

この報告で提案したモニタリングシステムはいずれも HACCP 法に基づいているが、その推定費用は、厳しさの程度にそのまま比例するわけではない。これは、計画と実施、内部点検と外部監査のための固定費用があるためである。主要な費用項目の一つは、研修への投資の形をとった初期費用である。この投資は5年間有効であると想定する。この有効な期間が長いほど、算出される費用は小さくなる。この投資は農家単位のそれぞれに必要なため、小規模な農家では面積あたりの費用が高つくことになる。図8には、研究対象としたモデル農家全部についてのモニタリング費用を要約している。

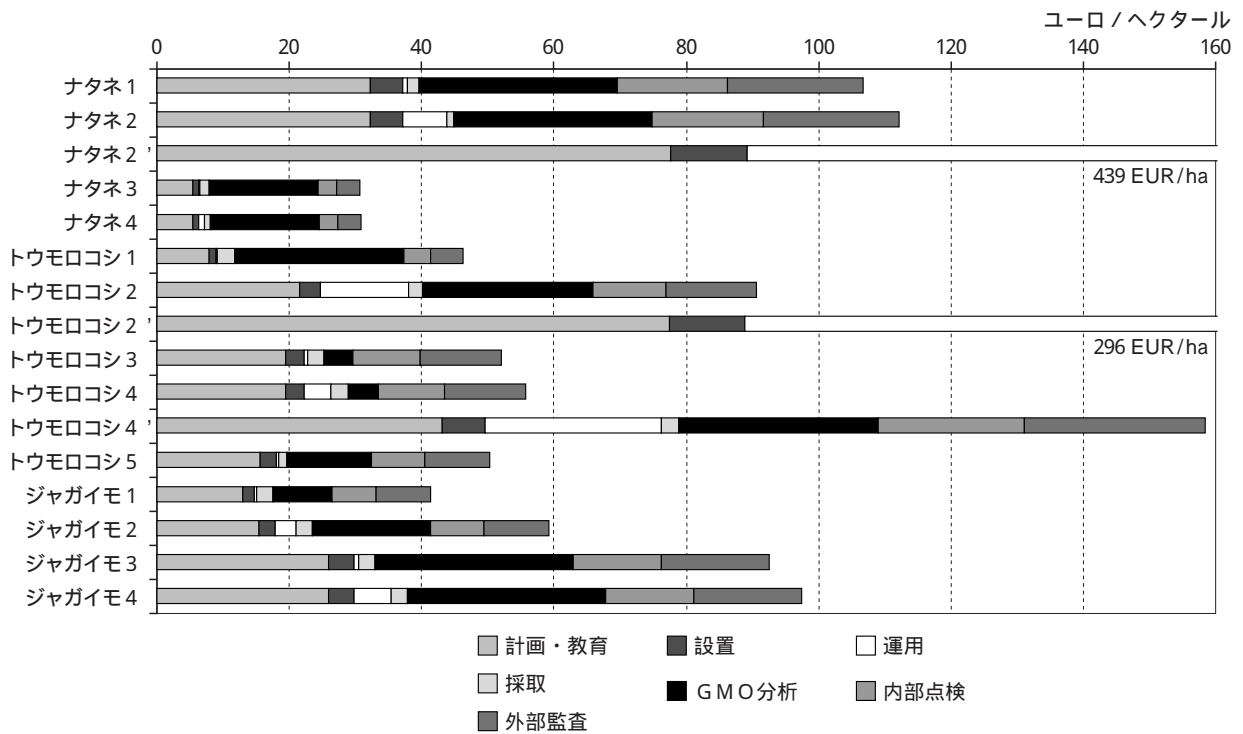


図8 各農家タイプでの面積あたり年間モニタリング費用の推定

小規模な農家（研究対象の作物の面積が10ha未満の農家）では、他の小規模農家と協力することで1農家の面積あたり投資費用は減少すると想定する。それでもなお、小規模な農家はこの費用の影響を明白に受け、面積あたりの費用はかなり高い。図8でわかるように、もう一つの重要な費用項目は GMO 検査である。ここでは、検査される単位がそれぞれの圃場であると想定する。そのため、圃場あたりの検査点数と圃場サイズが、モニタリングの費用を決める重要な変数となる。導入段階の時期と高価値の作物では検査率を高くする必要があるが、分別

システムがすでに運用されている場合は、通常は混入の確率がよくわかっているため検査頻度を減らすことができる。この解析では、ナタネ種子の圃場は毎年検査されるが、トウモロコシとジャガイモの圃場は2年ごとに検査されると想定する。想定した圃場の大きさは対象地区では一般的であるが、圃場サイズは農家ごとに大きく違っていることも予想される。他方、サンプリングの費用は、ほかの費用と比べてそう大きくない。GMO 混入の抑制をほかの品質管理と同時に行うと、GMO の解析に必要なサンプリングの費用を低くできると期待され

る。

3つのモデル作物の価格は大きく異なるため、モニタリング費用の重要性はモニタリング費用の生産物価格に対する比率でよく表される。ジャガイモではモニタリングによる平均費用の増加は小さく、生産価格の0.9~1.9%にあたる。トウモロコシでは、1 haだけでトウモ

ロコシを生産するとくに小さな農家を別にすると、モニタリング費用は2.7~7.7%である。ナタネ認証種子の生産は、モニタリング費用の影響をもっとも大きく受けるモデル作物であり、ここでも非常に小規模な農家タイプを別にすると価格の6.6~8.3%となる。食用ナタネの生産の関連費用は農家売渡し価格の4.2~5.5%となる。

5 混入時の経済損失

農業において GM 作物と非 GM 作物を分けるための分別システムは、事故、異常な気象条件、あるいは人間の間違いによって分別に失敗することがある。このような失敗は、一般栽培農家と有機栽培農家（あるいは特別な生産物に対して割増金がある場合の GMO 農家）に、どのような結果をもたらすだろうか。以下の分析では、混入が生じた場合の、選択した3つの作物の経済性と農家全体への直接の影響に注目する。混入の影響は、短期的影響（その栽培シーズン中に発生する）、中期的影響（その後3～5年間の活動に影響する）、長期的影響（5年以上先に発生すると思われる）に区分できる。

GM 作物の価格は、GMO が混入した場合の一般栽培農家と有機栽培農家での短期的損失に大きく影響する。EU では、これまで、この点に関する経験的なデータはほとんどない。米国で集められた事例から考えると、EU で栽培される GM 品種の作物価格が同等の品質の非 GM 品種の価格より低くなることは間違いない。米国において非 GM 品種に対して支払われた価格割増金は、トウモロコシと油料ナタネの農家売渡し価格の3%～9%の範囲であった。そこで、GMO が混入した場合の有機栽培農家と一般栽培農家の短期的損失を計算する前提として10%の価格低下を仮定した。これは、混入率が、

収穫物に GMO を含むことを表示する必要が生じる、ある決まった基準値を超え、混入した GM 品種は EU での商業栽培を承認されていると想定している。承認されていない GM 品種の混入レベルが1%を超えた場合、その作物は販売できない。この研究では混入による新たな変動費の発生はないと想定する。CAP（共通農業政策）に基づいたトウモロコシとナタネへの生産面積支払い、混入によっては影響されないと想定している。

5.1 一般栽培農家での GM 作物混入の影響

5.1.1 短期的な影響

一般栽培作物に GMO が混入した場合の短期的影響は、一般栽培作物と GM 作物との価格差によって異なる。表42に示すように、助成金を加えた売上総利益に対する10%を想定価格差としたときの影響は、面積支払いのような固定支払いの比率と、価格割増しの損失額によって変化する。たとえばナタネ種子農家は、種子に対する価格割増金がなくなることによって売上総利益の50%以上を失うだろう。一般栽培のナタネとトウモロコシの場合は面積支払いが大きいので、損失は中程度である。ジャガイモでは面積支払いの影響は小さく、損失の程度は価格差によって決まる。

表42 GM 作物が混入した場合の一般栽培農家の短期的損失*

モデル農家	損失 (EUR/ha)	損失 (売上総利益**の%)	損失 (EUR/t)
油用ナタネ生産 農家3(ドイツ)*** 農家3(フランス)	72.4 53.5	10.4 6.5	23.1 15.25
種子ナタネ生産 農家1(英国)	671.6	54.5	191.9
トウモロコシ(かんがい) 農家1(フランス) 農家3(フランス)	100 108.7	10.5 9.9	9.85 10.8
ジャガイモ 農家1(ドイツ) 農家3(ドイツ) 農家1(英国) 農家3(英国)	386 481 556 500	17 17 26 19.8	9.2 17.7 13.1 22.2
* 各値は、それぞれの作物生産システムの経営状態のデータに基づく(付録参照)。 ** 売上総利益は、助成金を加算した金額。 *** ドイツ、フランス、英国はデータ元を表す			

ドイツとオーストリアでは、1998年以降、「非組換え (without genetic engineering)」生産物の自発的表示が可能となっている。それらの規則では、生産者はその生産物が指定された基準に従って生産されたという証拠を示す責任がある。ただし、規則には重要な免除条項が含まれている。生産物が GMO で非意図的かつ不可避免的に汚染された場合でも、「非組換え」生産物という表示ができるのである。農業活動などにおいてこれらの要件を満たすための追加規則は、これまでのところドイツとオーストリアでは詳細には定められていない。「非組換え」生産ラインをもつ農家で混入があった場合に、この表示のある生産物を売る権利が失われるとすると、その農家は生産物を安い価格で売らなければならない。割増し価格があるため、その経済的損失は一般栽培の農家よりも大きいかもしれない。

5.1.2 中期および長期的な影響

一般栽培農家での自生植物問題への対策は、とくにナタネ農家とジャガイモ農家では、中期に見てもっとも難しい課題であるが、これには除草剤の使用が助けになる。さらに、一般栽培農家では、混入があった翌年の輪作に一般栽培作物の栽培が許されないということは、まずありえない。そのため、GM 自生植物を除去するための新たな活動の費用は、一般栽培農家中期的な損失に大きくは影響しないと思われる。混入の翌年以降の生産の変動費用は、これらの新たな活動 除草剤、機械使用、労働力の追加費用などと、査察と検査の活動のための新たな費用によって増加するだろう。「非組換え」表示プログラムに参加している一般栽培農家中期的損失は、有機栽培農家と、このような計画を持たない一般栽培農家との中間程度であろう。これらの損失の額は、各「非組換え」プログラムが扱っている作物と、GMO が混入した作物との価格差に大きく左右される。

一般栽培農家での GM 混入の長期的な影響は、農業システムの性格が GMO の非意図的な混入を抑制するかどうか強く依存しているため、今の時点では評価できない。GMO の混入が(たとえば地区内で GM 作物が広く栽培されているため)毎年発生する場合には、一般栽培農家が GMO をまったく含まない一般品種を作ることは非常に困難である。このようなシナリオでは、影響の大きさは「非組換え」表示プログラムや GM 混入基準値の規則に大きく依存する。

5.2 有機栽培農家での GM 作物混入の影響

5.2.1 短期的な影響

有機栽培農家での経済的損失の計算は一般栽培農家の場合と同じ想定に基づいている。混入レベルは法定基準値より高く、作物は GM 作物として売らなければならないと想定する。この場合も、混入のある作物を売るためには、混入した GM 品種は EU での流通を許可されていなければならない。有機栽培農家で GM 作物が混入した場合は、有機農業への助成金および有機作物の価格割増し分(これは有機作物すべてに適用されるわけではない)を失うと仮定する。短期的な経済損失を表43に要約する。

ナタネ栽培の場合、ドイツの農家のデータによれば、価格割増しが比較的小さく、また、収穫の一部(60%)だけが有機栽培作物として売られているため、損失は中程度である。ドイツでは、有機栽培農業の継続に対する助成金が失われる影響が大きい。一方、有機種子生産の場合は、損失がはるかに大きい。これは、有機認証種子の価格割増しは変動費用の増大分に相当するもので、売上総利益については一般栽培の種子生産者と同一であるという想定に基づく。そのため、総収入が価格の低下で大きく減少すると、農家には非常に大きな経済損失があると予想される。有機栽培トウモロコシ生産の場合もこのような損失がかなり大きい。フランスでは有機栽培農業の継続に対する直接の助成金がないため、この損失は、混入のあったトウモロコシと有機栽培トウモロコシとの価格差による(135%~160%)。ジャガイモの場合にも短期的な経済損失が非常に大きい。これは有機栽培ジャガイモへの価格割増しが大いことによる。

一般に、有機栽培農家での経済損失は一般栽培農家よりもかなり大きい。有機栽培農家での短期的損失に関係するもっとも重要な要因は、有機栽培生産物に支払われる割増金である。有機栽培を行っていて GMO が混入した作物は、一般栽培作物より10%低い価格で売ることができる。価格割増し分を失うことに加え、GMO の混入の影響を抑えるための具体的な活動(機械の清掃や作物の分別など)あるいは点検活動や GM 混入除去の費用が有機栽培農家の短期的な損失に影響しうる。

表43 GM作物が混入した場合の有機栽培農家の短期的損失*

モデル農家	損失 (EUR/ha)	損失 (売上総利益**の%)	損失 (EUR/t)
油用ナタネ生産 農家4(ドイツ)***	217	25.8	106.4
認証有機栽培ナタネ種子生産 農家2(英国****)	1290.5	131.5	561.1
トウモロコシ(かんがい) 農家2/4(フランス)	1221.6	70.7	135.7
ジャガイモ 農家2(ドイツ) 農家4(ドイツ) 農家2(英国)	4733 5890 7305	91.6 99.3 101	188.6 361.3 292.2
<p>* 各値は、付録に示した経営状態のデータに基づく。</p> <p>** 売上総利益は、助成金を加算した金額。</p> <p>*** ドイツ、フランス、英国はデータ元を表す</p> <p>**** 有機栽培認証種子生産者には、一般栽培種子生産の収量の65%および、栽培費用が大きいことによる100%の価格割増しを想定した。経費の増大も大きいため、売上総利益は一般栽培種子生産者と同一のままである。</p>			

5.2.2 中期的および長期的な影響

中期的には、自生植物の問題が(とくにナタネとジャガイモにおいて)有機栽培農家にとって最重要の課題である。有機栽培農家の圃場がGM自生植物で汚染されている間は、有機生産物の表示のもとでの作物の栽培、販売が許可されない可能性があるからである。さらに、最長で10年もの間土壤中で生存する種子があることや、小さいもの「手作業選別」が必要になることなどから生じる困難に加え、ナタネとジャガイモを生産する有機栽培農家では、一般栽培農家ではよく使われている除草剤の使用が許されないため、自生植物の除去は容易ではない。このため、有機栽培農家での「汚染除去期間」は、一般栽培農家よりも長くしなければならない。ここでは、専門家の意見により、その期間を5年までとした。

GM自生植物の問題を解決するための費用は、「汚染除去活動」に必要な期間、活動の正確な決定(ある作物を栽培することが許されるかどうかなど)および種子バンク中の自生植物の生存率を下げるための追加対策の費用に左右される。加えて、有機栽培農家では新たな労働の投入が必要になるに違いない(手作業による自生植物の除去など)。有機栽培農家が、「汚染除去期間」中の汚染圃場の輪作で一般栽培の作物を使うことが許され、栽培した作物を一般栽培の生産物価格で販売できる場合には、有機栽培農家の中期的な損失は、一般栽培農家と比較した有機栽培農家の輪作全体の売上総利益の差にな

る。有機栽培農家が「汚染除去期間」中に「汚染」圃場で作物を栽培することがいっさい許されない場合、有機栽培農家はその圃場での輪作で通常得られるはずの売上総利益を失う。さらに、その有機栽培農家は、「汚染除去期間」中も、汚染圃場に関連する固定費用を負担しなければならない。

有機栽培農家に対するGM混入の長期的影響については、GMOの非意図的な混入を抑えるための農業システムが正確にどのようなものかに大きく依存するため、ここで全体を評価することはできない。GMOの非意図的な混入が毎年生じるとき(ある特定の地域でGM作物が広く栽培されている場合など)は、有機栽培農家は、その資格を失ったり、EUと各国の関係機関による規則に従って作物を栽培することが困難になったりするだろう。このような状況では、有機作物を作ることはほとんど不可能であるため、影響を受ける農家は相当の損失と経済問題に直面すると考えられる。ただし、このような場合、GM作物の栽培率が高い地区の有機栽培農家は、GMOの混入を防ぐ方法がないことによって、収入に損害をこうむるので、補償支払いをするかどうかは政策課題となるに違いない。

5.3 混入に備えた保険

5.3.1 指標的保険費用

今のところ、GMOの非意図的な混入の可能性を最小

にする農業システムの「一般的な」失敗率については実例がない。そのため、認証種子生産と有機農業での「システムの失敗」を、ドイツとデンマークのデータで分析した。ドイツでは市場に出されるトウモロコシ種子の5%から6%程度と、油用および繊維用の作物について、販売後の管理活動に関する苦情が出されている。ジャガイモでの苦情率は10%にもなる。一般的に、苦情の約半数は種子品質の不良、すなわち発芽率、他の植物や雑草種子の混入、種子純度の問題による。

専門家による推定とデンマークの有機農業での違反についての統計データは、1年あたり0.2%から0.3%の農家が有機栽培農家の資格を失うこと、また有機栽培農家の約3%までが違約金を払わなければならないことを示している。これらのデータに基づいて、2つの「失敗率」(0.2%と3.0%)を選択した。そして、これらを一般栽培農家と有機栽培農家での短期的損失(5.1.1節と5.2.1節を参照)と組み合わせて、GMOの非意図的混入を最小にする農業システムの平均「失敗費用」を推定した(表

44)。有機栽培農家では短期的損失がかなり高いため、「失敗費用」は一般栽培農家の13倍にまでなる。これは、とくにジャガイモ生産に関係する(「失敗費用」はヘクタールあたり約220ユーロにもなる)が、トウモロコシ生産においてもかなり高い費用(ヘクタールあたり37ユーロ)が見られることがある。GM成分の混入がない場合に得られる売上総利益と比較すると、推定された「失敗費用」は、有機栽培農家と一般栽培農家のどちらにおいても相対的に低いレベルである。

計算では、混入のあった作物はGM作物として売らなければならないと想定した。混入レベルが1%を超えていることを、ここでは意味している。種子ナタネの生産の場合、0.3%の基準値を想定しているため、0.3%を超えるが1%よりは低い混入レベルの場合、その作物を非GM種子としては販売できないが、非GM一般栽培作物としてなら販売できることになる。この可能性を考慮すると、費用はわずかに減少するが、その差は無視できる。

表44 失敗率が0.2%と3%のときの有機栽培農家と一般栽培農家での「システムの失敗」の費用*

作物	国	有機栽培農家での損失 ¹⁾	一般栽培農家での損失 ¹⁾	各失敗率を想定した「システムの失敗」の費用 (EUR/ha)			
				0.2%	3.0%	0.2%	3.0%
				EUR/ha		EUR/ha	
				有機栽培農家		一般栽培農家	
ナタネ (認証種子)	英国	1290	672	2.58	38.7	1.34	20.16
ナタネ (油用)	ドイツ	217	72	0.43	6.51	0.14	2.16
ナタネ (油用)	フランス	n.a.	54	n.a.	n.a.	0.11	1.62
トウモロコシ (子実、かんがい)	フランス	1222	109	2.44	36.7	0.22	3.27
加工用ジャガイモ	ドイツ	4733	386	9.47	141.99	0.77	11.58
早生ジャガイモ	ドイツ	5890	481	11.78	176.7	0.96	14.43
加工用ジャガイモ	英国	7305	556	14.61	219.1	1.11	16.68
早生ジャガイモ	英国	n.a.	500	n.a.	n.a.	1.0	15.0

* 計算は各作物生産システムの経営状況のデータに基づいている(付録参照)

1) GM成分が混入した場合は、一般栽培の作物と比較して価格が10%低下すると仮定。

GMOの作物への非意図的な混入は、一般的な製造物責任保険、あるいはGMO放出にかかわる特定の商業リスクを扱う個別の保険によって、その商業リスクに備えることで管理できるだろう。上の費用計算の結果は、将来の保険費用の指標と見ることができる。計算された費用は、達成可能な売上総利益および予想される被害と比較すると、かなり小さい。ただし、この計算のもとになる失敗率は、考慮しなければならない基準値によって異なる。厳しい基準値を考慮しなければならない場合など、失敗率が高くなると、予想される保険費用も上昇するだろう。もちろん、そのような状況では、このようなシステムが実行可能かどうかという問題が生じる。

5.3.2 保険と個別の契約 - 現在の状況

GMOの非意図的な混入の商業リスクが保険の対象になるかどうかは、この分野における責任制度に強く左右される。EU加盟国には、環境中へのGMOの計画的放出に関してかなり多様な法的枠組みがあり、とくに放出にかかわる責任の問題を解決する方法が異なっている。いくつかの加盟国では、この目的に、おもに環境法や一般的な製造物責任規則の分野の既存の法令を利用しているが、他の国々は、たとえばドイツのように、各産業に対する個別の法律を作ることを選択している。

EUの一部の加盟国では、この法制度は、過失の有無にかかわらずGMO生産者にGMO混入の責任をとらせる「厳格責任」の原則をもとにしている。このようなシステムの下では、原告は、被告に責任を負わせるために違法行為を立証する必要はまったくない。厳格責任システムは、ドイツ、オーストリア、フランス、スペイン、フィンランドなどで導入されている。「過失に基づく」責任システムでは、補償の有無は、原告がGMO生産者の側の過失あるいは何らかの違法行為を示せるかどうかによって決まる。このようなシステムは英国やデンマークなどで使われている。また、EUの一部の加盟国では、農家は、法律または司法機関によって、GMOの計画的放出による損害の責任から除外されている。

種子生産については、通常、種子を生産する農家は責任から除外されている。そして、種子会社または種子会社との契約に拘束された流通業者は生産された種子の品質を保証しなければならず、実際上の責任があると考え

られている。欧州委員会は、環境責任に関する法案を2002年1月に提出したが、これにはGMOによって生じた生物多様性、水、土壌への被害が含まれている。GMOの放出がとくに認可されていたり、被害が現在の科学的知識に基づいては予見不可能であったりした場合は、厳格責任は適用されない。この法案は、GM作物が非GM作物に混入することによる経済的損害は対象にしていない⁶⁷⁾。

概して言えば、農家がGM作物を栽培する場合の保険適用は難しいであろう。GMOの非意図的な混入による損害を対象とする(一般または特定の)保険を保険会社が提供するためには、特有の困難が存在する。GMOあるいはGMOを含む製品の計画的放出に関連する商業リスクに関しては、EUの保険業者が利用できる情報がほとんどない。これは、この分野でありそうな損失のパターンを計算する手段についても同様である。このようにデータが存在しないため、保険業者の間では、このような商業リスクへの保険契約に関する基本的な疑念が生じている。農業における遺伝子工学の利用、GMOまたはGMOを含む製品の計画的放出の商業リスクの様相はきわめて多様化しており、定量化は非常に難しい。保険業界の見地からは、この分野における商業リスクが明らかになっていないため、評価は難しく、したがって保険を適用することも困難である。

保険業者と農家とが、個別の契約の中でGMO混入の影響という複雑な問題を取り扱うためには、かなり大きな制約がある。これらの制約には、GMO混入が発生する確率と損害の程度の算出を可能にする経験的データがないこと以外に、個別の契約のための枠組みを作れるような明確な規則がこの領域に欠けていること、保険業者、農家、およびこの分野で活動するアドバイザーの間に、この問題について非常に限られた経験しかないこととも関係している。その結果、契約の両当事者が避けたいと思うような、かなり不安定な状況が、とくに今のところはこのような商業リスクについての保険契約には非常に限られた可能性しかないという事実によって生じている。GMOの混入があった場合に損害を受ける個人あるいは組織は、十分な損害補償を得ることを期待できないこの状況に、大きな不満をいだくであろう。

67) EC (2002) Frequently asked questions on the Commission's proposal on Environmental Liability. Memo 02/10
(訳注)この文書は次のURLで閲覧できる: www.wko.at/up/enet/stellung/uwhfaq.pdf

6 対象作物での合計費用の解析

これまでの章では、それぞれの費用について説明、推定した。第3章では、農業活動の変更を提案し、関連する費用も推定した。第4章では、GMO混入を農家内でモニタリングする方法について一連の提案を紹介し、各農家タイプについての推定費用を示した。最後に第5章では、調査した基準値レベルを満たせなかった場合の経済的リスクと関連費用(この文書では指標的保険費用と呼ぶ)を扱った。この章においては、農業活動の変更にかかわる費用、モニタリング費用、指標的保険費用を、各モデル作物および各農家タイプごとにまとめて取り扱い、合計費用を示して解析する。想定した条件下で実施されているシステムは存在しないため、費用についての経験的データは入手できないことに注意する必要がある。推定費用のいくつかは、他の地域や他のシステムからのデータに基づいている。したがって、この章で示す推定費用を解釈するには注意が必要である。

この研究では、生産量の半分までがGM作物となった将来の状況における経済的影響の費用面のみを扱う。推定費用は、予想される助成金を含む売上総利益との関係で示している。労働⁶⁸⁾と資産の費用は売上総利益には含まれない。そのため、売上総利益は、農地を利用するための資本費用を考慮しない、税込みの農家収入を意味している⁶⁹⁾。費用と売上総利益との比較は、一連の費用を分かりやすく示すために使っただけである。ここで示す結果は、想定した表示基準値を考慮したときに、非GMOを基本とする農業が、各農業地域へのGM品種の導入による状況の変化に適應できるかどうかの指標となるだけである。現実には、非GM作物とGM作物の分別は、需要者側や市場価格にも影響を及ぼす。したがって、ここで示す結果を非GM作物とGM作物の今後の市場価格の予測や需要の予測に使うことはできない。

これまでもGM作物と非GM作物を分別する費用

を扱っている研究はいくつかあるが、ここで使用したようなシナリオ的手法は使われていない。研究の大部分は、非GM作物とGM作物の分別の実例がすでに存在する南北アメリカの市場で実施されている。Buckwellら⁷⁰⁾は、作物の分離についてのいくつかの事例研究を分析している。その一部は非GM作物とGM作物の分別に関するものであったが、農家レベルの費用は2つの事例で示されているだけであった。ブラジルの非GM大豆生産の同一性保持(identity preservation)では、価格の10%分の費用が増大し、カナダの同一性保持GMナタネ生産者の場合は、価格の6%から8%に相当する費用増加があった。最初の事例では、使用した基準値は収穫前の解析で0.1%であったが、目標基準値は1%であった。第二の事例では、GM作物が分別されていたので、基準値は使われなかった。さらに、周辺の非GM生産のモニタリング費用が含まれるかどうかは示されていない。

もっと最近の研究では、Bullockら⁷¹⁾が、米国における非GMのトウモロコシと大豆の生産の同一性保持による経済的影響を調べている。その結論は、長い分離距離をおくかGMO無栽培地域を設定しないと、1%の基準値を下まわる非GMトウモロコシ生産は非常に難しいということであった。非GM大豆では、同じ基準値に従うための農家レベルの新たな費用は5~6ユーロ/トン程度になる。混入が発生しうることが確認されたプロセスは、播種と収穫の際の豆の混合によるものだけであった。したがって、費用は機械の掃除だけが対象となる。農家レベルでのモニタリングはなく、GMO混入の検査は引き渡し場所で行われ、費用は1ユーロ/トン未満であると仮定した。これらの費用はどちらも価格の約3%にあたる。その調査結果によると、食品流通経路(food chain)で非GM作物とGM作物を分離するた

68) 投入労働力が農家の家族以外から購入されると考えられるような場合には、人件費を売上総利益の計算に含める。

69) 経験的なデータがないため土地費用を考慮することができないが、使えるかもしれない手法が2つある。

(1) 選択した地区における、調査した作物の生産に使われる農地のリース価格についての経験的データの利用。詳細なデータが利用できるときは、非常に簡単に結果が得られ、また、灌漑設備のある圃場や、すでに有機農業に転換した圃場など、圃場の特性を研究に取り入れることができる。

(2) 農地価格についての経験的データの利用。面積あたりの価格から、適切な金利を選択して年間の資産費用を推定できる。結果は適用する金利に大きく左右される。

70) Buckwell A, Brookes G and Bradley D (1998) "Economics of Identity Preservation for Genetically Modified Crops" CEAS Consultants (Wye) Ltd. CEAS 1 745/GJB.Wye, England.

71) Bullock D, S, Desquilbet M and Nitsi E, I (2000) "The Economics of Non-GMO Segregation and Identity Preservation" Working document, October 21, Dep. of Agricultural and Consumer Economics, University of Illinois. USA

めのおもな費用は穀粒取扱いシステムによる流通の問題点から来ていると思われ、農業活動の変更や GMO 含有のモニタリングの影響は小さい。ただし、関連費用の大きさは目標とする基準値のレベルに大きく左右される。

需要の弾力性が非常に高いと仮定すると、非 GM 作物に対する価格割増額は、作物別費用の良い指標となる。米国農務省 (USDA) によれば、米国における 1999/2000 年の非 GM 大豆に対する農家レベルの価格割増金は 4 ~ 6 ユーロ/トン程度であり⁷²⁾、上の Bullock らから引用した費用とほとんど同じである。また、米国における 1999/2000 年の非 GM トウモロコシの価格割増金は非常に低いことが示されている (2 ~ 4 ユーロ/トン)。これは、トウモロコシの分別のために農業活動を大きく変更する必要があるため、費用は非常に大きくなるという、Bullock らの結論と明らかに食い違っている。(米国農務省の考えでは) 非 GM トウモロコシは Bullock らが想定した 1% の基準値を満たせないということが、その理由として考えられる。

Bullock らによる研究と同様に、この共存の研究は将来に備えた取組みであり、将来、欧州農業に GM 品種が存在する状況下で非 GM 品種が栽培されることになる想定している。いくつかの農家タイプを研究することによって、非 GM 農作物への影響が確認、定量されている。この研究では、GM 品種の圧力を 2 通り (10% と 50%) としている。2 つの異なる仮定は、GM 混入の可能性を研究するために使われているだけであり、将来の GM 品種の市場シェアを予想することは意図していない。上で引用した研究と比較すると、費用の解析は、目標基準値を守れなかった場合に予想される費用も含めることで、より広く進められている。これらの費用を推定するためには、非 GM 作物と GM 作物の価格の関係を明らかにしなければならないが、この価格関係は生産費と (消費者の) 需要で決定されるものである。ここでは、どのモデル作物においても、GM 作物の市場価格は対応する一般栽培の非 GM 作物の価格より 10% 低いと想定している。これは、現在の北米での価格割増率に基づいている。ただし、米国での現在の状況と比較すると、GMO を含有する生産物に対する欧州消費者の信頼は低いと思われることを反映して、高めの数値に修正してい

る。この想定に適切な変更を加えても、最終的な結果の変化は小さいことに注意すべきである。

モニタリング費用と指標的保険費用はどちらも基準値レベルの変更によって影響されないと想定し、かわりに、基準値を超える想定確率は変えずに農業活動についてだけ修正を加えている。実際には、基準値を変更すると農業活動、モニタリング活動、指標的保険費用など全体的なリスク管理に影響があり、この 3 つはどれも変更に応じて調整可能である。たとえば目標基準値を低い方向に変更しても、すでに推定した GMO 含有量が低いために活動の変更にはつながらない場合、(低く変更した) 基準値を超える確率は増大することになる。これは保険費用の増大 (われわれのモデルでは失敗率が増加することになる) として見ることができる。あるいは (たとえばサンプリング計画の強化で) オンライン・モニタリングを強化することによってふたたび混入の確率を下げ、したがって失敗率も下げながら、モニタリング費用を増加させることもできる。この 2 つの方法のうち費用効果の高いほうか、両者の組合せを選択することができる。

6.1 費用の分類

6.1.1 農業活動の変更の費用

第 3 章で示されている費用は、さまざまな農家タイプが、想定した基準値を満たせるように提案された、具体的な農業活動に対応している。修正された農業活動の一組について、それらの変更を実施する費用が第 3 章で推定されており、これらを全体費用の計算にそのまま使用している。いくつかの例では、変更は農家で流通と収穫後の管理 (たとえば、農家種子の保存や近隣農家との種子交換をやめることや専用の貯蔵施設を使うこと) に影響を及ぼすが、これらの活動にかかわる費用は推定していない。

6.1.2 モニタリングの費用

この文書で提案したモニタリングシステムは HACCP システムに基づいたものであり、おもに文書化の手法による。ここでの目的で、十分な相関性と GMO 成分の検出、定量の精度をもつ検出方法は、現在のところ PCR だけである。残念ながら、PCR 分析ではサンプリング

72) Lin W, Chambers W, Harwood J (2000) "Biotechnology: U.S. Grain Handlers Look Ahead" (バイオテクノロジー: 米国の穀物関係者は先を見ている) Agricultural Outlook, April 2000, ERS/USDA. USA.
(訳注) この記事は、<http://www.ers.usda.gov/publications/agoutlook/apr 2000/ao 270 h.pdf> で閲覧できる。

から結果が得られるまでに何日かが必要である。そのため、収穫された作物が検査の結果が明らかになる前に出荷されてしまい、それによって大量の GMO が混入した作物が非 GM 作物と混合されてしまうことがあるだろう。HACCP の手法の積極的なオンラインモニタリング体系によって、この可能性はかなり低下する。

費用の多くの部分は、研修とモニタリングシステム設置からなる初期投資である。ここでは、これらの費用を5年にわたって割り振る。内部点検と外部監査の費用をあわせた初期費用は農家サイズが異なっても変化しない。これは規模が非常に小さい農家にとっては極端に高い費用になる。かわりに、10ha未滿の農家は他の小さな農家と共同でモニタリングシステムを設置、点検し、監査を受けると想定する(詳細は4.2.4を参照)。GMO成分を分析する単位は1つの圃場からの収穫物である。ナタネは毎年検査されるが、トウモロコシとジャガイモは2年ごとに検査される。

6.1.3 指標的保険費用

指標的保険費用は、「システムの失敗」(第5章)の短期的費用をもとに計算される。失敗の費用は、合意した基準値を意図的にではなく満たせなかった場合に、保険会社が支払うことになると予想される経済的損害として推定される。解析では、失敗率を3%と想定している(認証種子生産や有機栽培生産などのシステムの失敗率をもとにしている)。このように算出した費用は、収穫物への混入の商業リスクに対して予想される保険料と見ることができ、したがって指標的保険費用と呼ぶことにする。この計算では、1%を上まわる混入がある作物はGM品種として売らざるをえないと想定している。GM品種の価格は各作物の従来品種より10%低いと仮定する。ナタネ種子生産の場合は、混入の割合が0.3%より上であっても1%未滿であれば、その作物を一般栽培作物として売ることができる。この可能性を考慮すると費用はわずかに低下するが、その差はごく小さい。失敗の費用は第5章で各作物ごとに推定され、表45にまとめられている。

表45 失敗率が3%のときの有機栽培農家と一般栽培農家での「システムの失敗」の費用

作物	国	一般栽培農家 (EUR/ha)	有機栽培農家 (EUR/ha)
ナタネ(認証種子)	英国	20.2	38.7
ナタネ(農家保存種子)	ドイツ	2.2	6.5
トウモロコシ(かんがいあり)	フランス	3.3	36.7
ジャガイモ 早生品種	ドイツ	11.6 14.4	142 176.7

6.2 対象農家タイプでの合計費用

以下の節では、農業活動変更の費用、GMO成分モニタリングの費用、指標的保険費用を、各農家タイプごとに示す。合計費用を面積あたりとトンあたりで示し、さらに、ヘクタールあたりの費用を売上総利益⁷³⁾に対する割合で、トンあたりの費用を価格に対する割合で示す。ナタネとジャガイモについては、異なる基準値での合計費用の推定値を2つの表で示す。この節では地区内のGMOの割合が50%の状況だけを考察する。3つの作物すべてについて、農家タイプ1から3の数値を作物ごとに示す。2つの節で、他の農家タイプを例として、一般

栽培農家が有機栽培農家かによる影響と、農家規模による影響とを述べる。さらに、異なるモデル作物を簡単に比較し、作物による違いに注目する⁷⁴⁾。この章の最後では、農業助成金を含む場合と含まない場合の、売上総利益に対する費用を比較する。

6.2.1 種子用ナタネ生産の合計費用

ここでは、農家1、農家2、農家3を、それぞれ特有の管理システムを持つ3つの基本的な選択肢として議論する。各農家についての基礎的情報と関連する合計費用を表46に示す。

73) ここでは、売上総利益は、総収入に有機農業への支払いを含む面積支払いを加え、変動経費を引いたものと定義する。

74) トウモロコシ農家5については、活動変更の費用の推定が困難であるため示さない。

面積当たりの費用 (目標基準値0.3%)

合計費用は、農家3の126ユーロ/ha、農家1の127ユーロ/haから、農家2の345ユーロ/haまでの範囲であった。農家1での費用の大部分はGMO成分モニタリングの費用であり、農業活動変更の費用はゼロと推定される(輪作に新たに春作物を追加する)。有機栽培の農家2では、休閑地への被覆植物の播種によって混入の率を低くしておく必要がある。このため農業活動変更の費用は非常に高くなり、合計費用は対応する一般栽培農家のほぼ3倍になってしまう。休閑地への播種の追加推定費用(194ユーロ/ha)については、現在の農業活動には休閑地の

管理がまったく含まれないと想定している(詳細は3.1を参照)。けれども、長期に見て雑草化の問題がある場合は、休閑地の耕起と雑草の除去が現在の活動にすでに取り入れられていることがある。この場合は、追加の新たな費用は小さいため、合計費用も小さくなるだろう。農家1と農家2でのモニタリング費用は、収量が低く(2.3~3.5トン/ha)、ナタネ生産圃場の面積が小さい(12ha)ため、どちらも非常に大きい。またこの2つの農家では高付加価値の生産物を販売しており、とくに有機認証種子生産については指標的保険費用が高い。

表46 各ナタネ農家¹⁾の関連費用 (目標基準値0.3%)

ナタネ	農家1 認証種子一般栽培	農家2 認証種子有機栽培	農家3 農家保存種子一般栽培
農家データ:			
モデル作物面積 (ha)	12	12	70
収量 (t/ha)	3.5	2.3	3.14
価格 (EUR/t)	369.2 ³⁾	738.4 ⁴⁾	231
売上総利益 (EUR/ha)	981.2	981.2 ⁴⁾	696.8
農業活動変更の費用 (EUR/ha)	0 ²⁾ (新たな春作物導入)	194.3 (春季休閑地播種)	93.2 ⁵⁾ (農業施設の専用化)
モニタリング費用 (EUR/ha)	106.8	112.1	30.8
指標的保険費用 (EUR/ha)	20.2	38.7	2.2
合計費用 (EUR/ha) (対売上総利益比)	127 (12.9%)	345 (35.2%)	126 (18.1%)
合計費用 (EUR/t) (対価格比)	36.3 (9.8%)	150 (20.3%)	40.1 (17.4%)
<p>(1) 条件: 地区内に50%のGM品種があり、農家内にはGM品種はない。 (2) 目標基準値を達成するためのもっとも安い解決策である。別の解決策として休閑地への被覆植物の春季播種が考えられるが、効果的ではあっても費用が大きい。 (3) 英国でのデータ (4) 農家2に対しては経験的データがない。トン当たりの価格は英国での一般栽培の価格の100%増しと仮定し、売上総利益は農家1と同一と仮定した⁷⁵⁾。 (5) 一般栽培ナタネ農家での農業機械の専用化と機械の清掃は、93.2ユーロ/haと推定され、現在の機械費から50%増加する。</p>			

食用と飼料用のナタネを一般栽培する農家3での費用の配分は、認証種子の一般栽培生産者である農家1とは

異なっている。農家3は自家生産種子を毎年使用する一般栽培生産者である。この農家は、混入の可能性を低下

75)一般栽培の認証ナタネ種子では、価格は369.2ユーロ/トンに相当する。したがって、有機認証ナタネ種子の価格は、 $369.2 \times 200\% = 738.4$ ユーロ/トンと想定する。価格割増しの額は、欧州のある有機認証種子生産者の代表者と話し合っ確認した。この割増し額は農薬の不使用などによって費用が増加することによっている。したがって、これは、おもに費用で決定される割増し金であり、消費者に販売される有機生産物価格の割増しが今のところ短期間の構造的な供給不足に強く影響され、長期に見た生産費の違いを必ずしも反映していないのとは性質が大きく異なる。

させるために、他の農家との機械の共有を避け、機械の掃除を増やす必要がある⁷⁶⁾が、これは機械費の増加の原因となる。農家1と農家2と比較すると、農家3のナタネの耕作面積(70ha)は6倍である。そのため、面積あたりのモニタリング費用はかなり小さくなる。また、混入の際の財政的損失が小さくなるため、面積当たりの指標的保険費用は低い(2.2ユーロ/ha)。

トン当たりの費用(目標基準値0.3%)

農家1と農家3では、トン当たりの費用は40ユーロ/トン前後であるが、認証種子を有機栽培する農家では、150ユーロ/トンの追加費用が必要になる。この違いは、活動を変更した費用と、農家1、農家3と農家2の間の収量の差によって説明できる。有機生産物には価格割増しがあると想定しているため、費用の違いは、生産物価格に対する割合で見たときには小さくなる。この追加費用は、有機認証種子では価格の20.3%、一般栽培認証種子では9.8%、保存種子による食用・飼料用作物の一般栽培では17%にあたる。

収益性と市場への影響

これらの費用は、対象とした農家の収益性と競争力の低下に、かなり厳しい影響があることを示している。認証ナタネ種子では、種子購入費用は農家の投入費用のほ

んのわずかの割合しか占めておらず、追加費用を購入者に回す可能性が現実的であろう。EUの内外のGMO無栽培地域の認証種子生産者と競争する場合は、GMO無栽培地域の方が競争上優位となり、GM作物栽培地域での種子生産者の状況はさらに苦しくなるだろう。

農家3ではナタネを一般栽培するが、収穫したナタネの一部を次の輪作の種子として使用しているため、状況が異なるかもしれない。この農家が認証種子生産の基準値0.3%を達成できなくても、混入のレベルは食用・飼料用生産の1%の表示基準値よりも低い場合がある。この場合の実際の損失は、農家保存種子を市場価格で購入した認証種子と置き換える費用だけである。このため、この農家は、経済的損失について、ここに示した他の農家よりも大きな安全マージンを確保できるだろう。

0.1%の基準値

農業活動の推奨される変更は目標とする基準値によって異なる。農家1と農家2では、0.1%の基準値を守るための推奨農業活動は、輪作の休閑部分の管理を変更し、春にイタリアンライグラスかハイブリッドクローバを播種することである。表47に0.1%の低い基準値を守るための合計費用を示す(各農家の基礎的情報については表46を参照)。

表47 各ナタネ農家¹⁾の関連費用(目標基準値0.1%)

ナタネ	農家1 認証種子一般栽培	農家2 認証種子有機栽培	農家3 農家保存種子一般栽培
農業活動変更の費用 (EUR/ha)	194.3 (春季休閑地播種)	194.3 (春季休閑地播種)	- (達成は不可能)
モニタリング費用 (EUR/ha)	106.8	112.1	-
指標的保険費用 (EUR/ha)	20.2	38.7	-
合計費用(EUR/ha) (対売上総利益比)	321(32.7%)	345(35.2%)	-
合計費用(EUR/t) (対価格比)	91.8(24.9%)	150(20.3%)	-

(1) 条件: 地区内に50%のGM品種があり、農家内にはGM品種はない。

76) 機械利用の制約が増えることにより、機械費が50%増加すると想定する(93.2ユーロ/ha)。

推奨される農業活動を実施する費用は、農家1と農家2では売上総利益の35%程度である。また、トン当たりの合計費用は価格の20~25%程度である。農家1ではこれらの費用は非常に高く、基準値が0.3%のときの2倍以上であるが、有機栽培の農家2では費用は変わらない。

結論

結果は、モニタリング費用は一般栽培による認証種子生産者にとっては厳しいことを示している。モニタリングシステムが農家内の他の作物にも使えるなら、この費用を減らして面積あたりの費用を下げるのが可能であろう。このシステムを計画し、実施するための出資の平均有効期間を5年と仮定する。有効期間がもっと長ければモニタリング費用は減少することになる。モニタリングの費用に影響する他の要素はサンプリングの費用とGMO検査の費用である。将来は、検査技術の発達によってGMOの検出と定量の費用は安くなるだろう。

有機認証種子生産者の場合は、農家1とは異なり、農業活動を変更するための追加費用によって、GM品種が栽培される地域での生産の合計費用は非常に高い。GMO無栽培地域での有機認証種子生産と競争する場合、GM品種栽培地域で有機認証種子の生産を続けるには市場価格は低すぎるだろう。同じ結論は、0.1%の基準値をめざすときの、一般栽培と有機栽培の両方の認証種子生産者にも該当する。

農家保存種子を利用するナタネ一般栽培農家(農家3)では、生産物の0.1%の基準値を守ることができる農業活動の変更は提案できない。

6.2.2 トウモロコシ子実生産の合計費用

農家タイプ1、2、3を、それぞれ特有の農業システムをもつ3つの基本的な選択肢として示す。各農家の基礎的情報と推定費用を表48に示す。

表48 トウモロコシ生産¹⁾の関連費用(目標基準値:1%)

トウモロコシ	農家1 一般栽培 集約的生産 (農地面積の80%)	農家2 有機栽培 (農地面積の10%)	農家3 一般栽培 非集約的生産 (農地面積の20%)
農家データ:			
モデル作物面積 (ha)	50	6	20
収量 (t/ha)	10.15	9.0	10.06
価格 (EUR/ha)	98.5	228.7	108.1
売上総利益 (EUR/ha)	956	1726	1098
農業活動変更の費用 (EUR/ha)	45.4 ²⁾ (開花時期の差50度日 + 収穫後管理 n.d.)	0 (現在の活動で十分)	n.d. (収穫後管理)
モニタリング費用 (EUR/ha)	46.2	90.8 ³⁾	52.0
指標的保険費用 (EUR/ha)	3.0	36.7	3.3
合計費用 (EUR/ha) (対売上総利益比)	95.6 (9.9%)	127 (7.4%)	55.3 (5.0%)
合計費用 (EUR/t) (対価格比)	9.3 (9.5%)	14.2 (6.2%)	5.5 (5.1%)
<p>(1) 条件: 地区内 GM 品種50%、一般栽培農家では農家内に50%の GM 品種、有機栽培農家には GM 品種はない。 (2) 農家1の近隣で GM トウモロコシを栽培する農家が、晩生品種から早生品種に変更するための費用 (3) トウモロコシを生産する面積が小さいため、3つの農家が協力して、出資費用を下げると仮定する (トウモロコシ面積は、3 × 6 ha となる)。 n.d. 計算していない。収穫後管理についての変更費用は推定していないため、合計費用には含まれていない。必要と考えられる変更は、トウモロコシの品種ごとに1つのサイロを使うこと、あるいはセンターの乾燥機に異なる品種を入れるときには最初の1回分をその分類からはずすことである。</p>			

面積あたり費用とトンあたり費用

面積あたりの合計費用は、農家3の55ユーロ/haから農家2の127ユーロ/haまで異なっている。農家2(有機栽培農家)では、追加費用はおもにモニタリングと指標的保険費用によって影響され、1%の基準値を守るために現在の農業活動を変更する必要はない。モニタリングを3つの農家が協力して行う(合計トウモロコシ面積は18ha)ことを仮定しても、これらの費用は大規模な一般栽培農家と比較して高い。有機トウモロコシは価格割増しが大きいため、指標的保険費用が大きい。価格比で見ると、価格割増しが大きいため、合計費用は農家1よりも小さい(9%に対して6%)。

農家1では費用の配分が異なる。圃場間の距離は非常に小さく(0.8m~100m)、他家受粉による混入の可能性が農家3より高い。農家1では、農家3にも適用される収穫後の変更のほか、栽培の段階で農業活動の変更が必要である(開花時期の差を50度・日)。そのため、農家1での追加費用は大きく、農家3の2倍近くになる。

農家3は、面積あたり合計費用がもっとも小さい。農家3は、周辺でのトウモロコシの割合が低く(耕作面積の20%)、トウモロコシ圃場間の距離が大きい(500m)トウモロコシ子実生産農家である。この農家は、収穫後の管理を変更するだけでよく、その費用は推定しなかった。

収益性と市場への影響

トウモロコシが集約的に生産される地区でトウモロコシを一般栽培する農家(農家1)が負担しなければならない費用(9ユーロ/トン)は、周辺でトウモロコシがあまり栽培されていない地区でトウモロコシを栽培する農家の費用(5ユーロ/トン)よりも高い。この結果は、新しい農家経営者がトウモロコシを栽培する場所を選択でき、これらの2つの地区での生産費とこの追加費用を比較したい場合の参考になるだろう。

0.1%の基準値

GMOの混入レベルを0.1%未満に抑えてトウモロコシを生産することは、種子純度を十分に管理した隔離計画、すなわち、収穫された子実の管理に加えて、効果的な圃場業務を採用しなければ無理であろう。その隔離戦略の費用は、その性質が非常に複雑でさまざまな農家がかかわるため、推定していない。モニタリングと保険の費用は、目標基準値が違って変わらないと仮定した。

結論

集約的生産が行われている地区でトウモロコシを一般栽培する農家1での追加費用は、3つの農家の中でもっとも高くなり(売上総利益の10%)、農家3での追加費用がもっとも低くなる(売上総利益の5%)。モニタリングの費用は、どの農家でも大きく、合計費用の大きな部分を占める。農家は、モニタリングの費用を抑えるため、トウモロコシ生産面積を拡大して面積当たりの費用を減らすことができる。また、付加価値の高い品種を生産することで、GMO成分のモニタリングの費用を埋めあわせることもできるだろう。

6.2.3 食用ジャガイモ生産の合計費用

農家タイプ1、2、3を、それぞれが特有の農業システムをもつ3つの基本的選択肢として扱う。各農家の基礎的情報および関連する合計費用を表49に示す。

面積あたりの合計費用

合計費用は、農家1の53ユーロ/haから農家2(有機栽培)の201ユーロ/haまでの範囲である。費用の原因は3つの農家のいずれでも同じで、モニタリング費用と指標的保険費用である。現在の農業活動は1%の基準値を守るには十分であり、農業活動変更のための費用は必要ないと考えられる。農家1と農家3では、費用の大部分がモニタリング活動のためのものである。有機栽培農家2では、有機ジャガイモ生産の付加価値が非常に高いことによって、指標的保険費用が極端に高くなる(14ユーロ/ha)が、一般栽培の農家1と農家3では、はるかに低い。どの農家でも、追加費用の合計は、売上総利益から見ると比較的到低い(2~4%)。

トン当たりの合計費用

トン当たりの合計費用は、農家1の1.3ユーロ/トンから農家2の8ユーロ/トンまで変動する。これらの値は、種子用ナタネ生産(36~66ユーロ/トン)およびトウモロコシ子実生産(6~9ユーロ/トン)と比べるとかなり低いが、これはジャガイモの収量(25~42トン/ha)が高いことによる。

さらに低い基準値

農家レベルで混入を減らすための対策をいくつか推奨できるが、0.1%の基準値未満に混入レベルを下げるには十分ではないだろう(詳細は第3.3章を参照)。提案する行動は、GMジャガイモ無栽培地域からの種いもを使

うこと、輪作の中でジャガイモの後に穀物を導入すること、収穫後は表示のついた箱で貯蔵することである。これらの行動のうち、収穫物履歴管理システムを実施する費用だけを推定した。合計費用（履歴管理システムの導入費用を含む）の分析結果を表50に示す。上記の対策を

すべて導入すると、農家1と農家2では、0.25%の基準値、農家3では0.5%の基準値が達成できるだろう（混入レベルの詳細については表34、各農家の基礎的情報については表49を参照）。

表49 ジャガイモ農家⁽¹⁾の関連費用（目標基準値1%）

ジャガイモ	農家1 一般栽培 ジャガイモ	農家2 有機栽培 ジャガイモ	農家3 一般栽培 早生ジャガイモ
農家データ： モデル作物の面積（ha）	30	25	15
収量（t/ha）	41.9	25.1	27.2
価格（EUR/t）	92	276	177
売上総利益（EUR/ha）	2275	5166	2813
農業活動変更の費用 （EUR/ha）	0 （現在の活動で十分）	0 （現在の活動で十分）	0 （現在の活動で十分）
モニタリング費用 （EUR/ha）	41.5	59.3	92.5
指標的保険費用 （EUR/ha）	11.6	142	14.4
合計費用（EUR/ha） （対売上総利益比）	53.1（2.3%）	201（3.9%）	107（3.8%）
合計費用（EUR/t） （対価格比）	1.3（1.4%）	8.0（2.9%）	3.9（2.2%）
(1) 条件：一般栽培農家ではGM品種と非GM品種の両方を栽培、有機栽培農家ではGM品種を栽培しない。農家周辺は25～50%のGMOが栽培されている。ドイツの農家のデータ			

表50 収穫物履歴管理システムを導入したジャガイモ農家⁽¹⁾の関連費用

ジャガイモ	農家1 一般栽培 ジャガイモ	農家2 有機栽培 ジャガイモ	農家3 一般栽培 早生ジャガイモ
農業活動変更の費用 （EUR/ha）	299 （履歴管理システム）	359 （履歴管理システム）	598 （履歴管理システム）
モニタリング費用 （EUR/ha）	41.5	59.3	92.5
指標的保険費用 （EUR/ha）	11.6	142	14.4
合計費用（EUR/ha） （対売上総利益比）	352（15.5%）	560（10.8%）	705（25.1%）
合計費用（EUR/t） （対価格比）	8.4（9.1%）	22.3（8.1%）	25.9（14.6%）
(1) 条件：一般栽培農家ではGM品種と非GM品種の両方を栽培、有機栽培農家ではGM品種を栽培しない。農家周辺は25～50%のGMOが栽培されている。ドイツの農家のデータ			

履歴管理システムの導入費用は、ジャガイモ生産者では非常に高い。関連費用の増加は、一般栽培農家では売上総利益の16%、早生ジャガイモ生産者では25%にもなる。農家3では、履歴管理システムの実施、モニタリング、保険費用の合計費用は、価格の15%に相当する。農家が生産面積を増やすと、増加した生産量に投資の費用が振り分けられるため、この費用の増加を軽減することができる。

収穫物履歴管理システムを導入する費用は、有機ジャガイモ農家についても計算した。しかし、有機栽培農家の場合、その作物管理システムには、すでに履歴管理システムが含まれているであろう。このため、有機栽培農家での費用は過大評価されていることになるかもしれない。

結論

ジャガイモ生産は、経済的な面ではトウモロコシやナタネよりも影響は小さい。1%の基準値を守るための費用は、ここで示す3つの農家で、価格の1.4~2.9%にあたる。農業活動の変更は必要なく、収量が高いためにモニタリングの費用は小さい。有機栽培では、指標的保険費用が大きいいため、合計費用はもっとも高い。ただし、農業活動を変更したとしても、0.1%未満の低い基準値を確実に満たすことはどの農家も無理である。

6.3 追加的な解析

異なる作物の生産者に対する全体的な影響は、各作物の農業的特徴と生産体系によって異なる。モデルとした3つの作物の各農家タイプは、それぞれ現在の農業構造に基づいて作られている。たとえば、サイズと気候条件について同一の農家タイプを使用していれば、モデル作物間の比較によって作物による違いをもっとよく示せたが、現実の農家にとっての費用にかかわる状況を示すことはできない。以下では、同じモデル作物中での違いをもたらししている2つの重要な特性、農業システムのタイプ(一般栽培か有機栽培か)と農家サイズの違いの影響を分析する。続いて、定義された農家タイプを使って、モデル作物間の違いを要約する。最後に、費用を現在の農家の利益レベルと関係付けたときの比較を、売上総利益に助成金を含む場合と、含まない場合について行う。

6.3.1 農業システムの影響

有機栽培は、GM生産が存在することによって、一般栽培とは違った影響を受ける。混入の可能性は、一般栽培

培に比べて多くの雑草が生育できる農業活動などのために高まるが、種子純度が高いことなどでその可能性が低いことも多い。作物モニタリングの費用は、有機農法では収量が低いことが多いためトン当たりの費用が高くなるが、そう大きくは変わらない。一般的で実質的な違いは、基準値を達成できなかったときの経済的リスクだけである。高い価格割り増しを失うリスクは、予測される経済的影響をかなり増大させる。ただし、すべての有機栽培作物が、高い価格割り増しを伴っているわけではない。表51では、3つのモデル作物すべての一般栽培の農家3と有機栽培の農家4の合計費用を比較している。

ナタネの一般栽培農家3と有機栽培農家4の費用の違いは、農家1と農家2に見られる違い(6.2.1を参照)とほぼ同様であり、一般栽培の農家3に比べて農家4の合計費用がはるかに高い。合計費用は、一般栽培農家の126ユーロ/haに対して232ユーロ/haであり、トン当たり費用の対価格比は、一般栽培農家の17%に対して41%である。すべての費用が増加しているが、輪作中の休閑圃場に被覆植物を播種することによる活動変更費用がとくに大きい。農家2の場合と同様、現在の農業活動の中に休閑地の管理(たとえばブラウ耕による雑草除去)がすでに含まれていれば、追加の費用は小さくなる。

トウモロコシの有機栽培農家4での面積あたり費用は92ユーロ/haであり、一般栽培農家3より70%近くも高い。収量が低いために、トンあたりの費用増加は100%近くにまで拡大する。おもな要因は、有機トウモロコシでは価格割増しがあるために指標的保険費用がかなり高くなることである(108ユーロ/トンに対して229ユーロ/トン)。けれども大きな価格割増しが、費用の売上総利益に対する割合(5.3%)と価格に対する割合(4.5%)を減少させるため、実際には、これらの割合は一般栽培農家での相対費用とほぼ同じである。

有機栽培の早生ジャガイモ生産者である農家4では、傾向は同様だがさらに極端である。有機栽培農家と一般栽培農家とのおもな違いは、やはり指標的保険費用である(107ユーロ/haに対して274ユーロ/ha)。一般栽培の早生ジャガイモは労働集約型の作物で価格が高いため、労働力と土地の費用を除いた売上総利益も大きい。そのため有機栽培生産物に対して受け取る200%の価格割増し分は、売上総利益の大きな増加に相当し、非常に高い指標的保険費用が必要になっている。価格が高いことの影響は、売上総利益や価格に対する割合で費用を比較した場合には小さくなり、有機栽培農家4の相対費用はわずかに高いだけになる。

将来、有機栽培の生産量が增大した場合には、有機栽培作物への価格割増しは小さくなると考えられる。その場合は、指標的保険費用は減少し、面積あたりとトンあ

たりの合計費用は小さくなる。けれども、価格と売上総利益も低下するので、売上総利益あるいは価格に対する費用の割合は実際には増加するかもしれない。

表51 3つのモデル作物における一般栽培農家3と有機栽培農家4の関連費用
(目標基準値：ナタネ0.3%、トウモロコシとジャガイモ1%)

	ナタネ ⁽¹⁾ 保存種子生産		トウモロコシ ⁽¹⁾ 非集約的生産		早生ジャガイモ ⁽²⁾ 生産	
	一般農家 3	有機農家 4	一般農家 3	有機農家 4	一般農家 3 ⁽³⁾	有機農家 4 ⁽³⁾
農家データ：						
モデル作物面積 (ha)	70	70	20	20	15	15
収量 (t/ha)	3.14	2.04	10.06	9.0	27.2	16.3
価格 (EUR/t)	231	277	108.1	228.7	177	531
売上総利益 (EUR/ha)	696.8	841	1098	1726	2813	5930
農業活動変更の費用 (EUR/ha)	93.2 ⁽⁴⁾ (農業施設 専用化)	194.3 (休閑地に 播種)	n.d. ⁽⁵⁾ (収穫後 管理)	0 (現在の活 動で十分)	0 (現在の活 動で十分)	0 (現在の活 動で十分)
モニタリング費用 (EUR/ha)	30.8	31.2	52.0	55.3	92.5	97.2
指標的保険費用 (EUR/ha)	2.2	6.5	3.3	36.7	14.4	176.7
合計費用 (EUR/ha) (対売上総利益比)	126 (18.1%)	232 (27.6%)	55.3 (5.0%)	92.0 (5.3%)	107 (3.8%)	274 (4.6%)
合計費用 (EUR/t) (対価格比)	40.1 (17.4%)	113.7 (41.1%)	5.5 (5.1%)	10.2 (4.5%)	3.9 (2.2%)	16.8 (3.2%)
<p>(1) 条件：地区内と一般栽培農家内で50%のGM品種を栽培。 (2) 条件：一般栽培農家はGM品種と非GM品種の両方を栽培。有機栽培農家はGM品種を栽培しない。 地区内では50%のGM品種を栽培 (3) ドイツでのデータ (4) 一般栽培ナタネ農家での農業施設専用化と機械の掃除の追加費用は93.2EUR/haと推定され、これは現在の機械費の50%増にあたる n.d. 算出していない。収穫後管理の変更の費用は推定しておらず、合計費用に含まれていない。必要と考えられる変更は、トウモロコシの品種ごとに1つのサイロを使うこと、あるいは乾燥センターで異なる品種を入れるたびに、最初の1回分をその分類からはずすことである。</p>						

これらの結果を検討する際には、目標基準値が一般栽培と有機栽培とで同一であるとしたことを忘れてはならない。目標基準値のレベルはきわめて重要である。GM品種が景観レベルでの生産のかなりの部分を占めている場合、0.1%というもっと低い基準値を満たして長期の生産を行うことは、研究対象とした13の食用、飼料生産農家(一般栽培農家および有機栽培農家)のいずれでも、経済的に困難である。

6.3.2 農家の規模の影響

農家の総面積、研究対象とした作物の生産面積、個々

の圃場の面積は、費用に影響し、面積が小さいほど、面積あたりと生産物トンあたりの費用は高くなる。もともと、栽培面積と圃場サイズは、どちらも農家の総面積と高い相関がある。他のすべてが同一で、面積だけが小さければ、混入の可能性が増大し、モニタリングの費用が、より小さな面積と生産量に対してかかることになる。表52では、この影響をナタネ農家2と農家2'およびトウモロコシ農家4と農家4'を比較することによって示している。農家タイプの2つの組は、農家の面積、作物の栽培面積、圃場サイズ以外は同じである。

大きな農家2と小さな農家2'では農業活動の変更に

大きな費用が必要であり、その大部分は休閑地への被覆植物の播種による(詳細は3.1節を参照)。農家2'は、面積が小さいことによってGM作物に近くなるため、農家2よりも他家受粉の影響を受けやすく、いくつかの対策(境界部の刈取り、非GMナタネの遅まき、輪作のいくつかの時点でプラウ耕に代えてチゼル耕を実施)を追加して導入する必要がある。さらに、農家2'ではGMOのモニタリングのために非常に高い費用が必要である。栽培面積が1haしかないため、同じ面積の他の農家と協力したとしても、費用を減らすためには不十分である。この結果は、すでに非常に高い農家2での費用と比較しても、さらに2倍以上も高い。この規模の農家では、より大きな農家での対価格の費用が20%であるのに対して、価格の40%にあたる追加費用があるため、競争力がないことは明らかである。

小規模な有機栽培トウモロコシ農家4'では状況が異なっている。大きな農家4でも小さな農家4'でも、農業活動の変更は必要なく、モニタリング費用は同じ規模

他の農家との協力によって大きく減少する。それでも、追加費用は現在の価格のほぼ10%にあたり、大きな農家4に比べると2倍以上である。

もう一つの小規模トウモロコシ農家である農家タイプ2'(表52には示していない)については、活動変更の費用と指標的保険費用は大きなトウモロコシ農家2と同一である。だが、栽培面積が1haと非常に小さいため、面積あたりのモニタリング費用が非常に高い。合計費用は、規模は大きいながらも同一のトウモロコシ農家の127ユーロ/haに対して、333ユーロ/haである。

ここで想定した費用の構成では、同一の基準値が両方の生産システムに適用される限りでは、生産物が一般栽培作物か有機栽培作物かよりも、農家の規模のほうが一般的に重要と考えられる。小規模農家は、面積あたりと生産物トンあたりで、高い費用を負担しなければならない。規模以外に違いのない農家の収穫物は同一の価格になるため、小規模農家がこの費用負担に関して価格割増しを受ける可能性はない。

表52 ナタネ農家2と2'(目標基準値0.3%)およびトウモロコシ農家4と4'(目標基準値1%)の関連費用

	ナタネ ⁽¹⁾ 有機認証種子		トウモロコシ ⁽²⁾ 有機栽培(非集約的)	
	農家2 (大規模)	農家2' (小規模)	農家4 (大規模)	農家4' (小規模)
農家データ:				
モデル作物面積(ha)	12	1	20	3
収量(t/ha)	2.3	2.3	9.0	9.0
価格(EUR/t)	738.4	738.4	228.7	228.7
売上総利益(EUR/ha)	981.2	981.2	1726	1726
農業活動変更の費用 (EUR/ha)	194.3 (春季休閑地 播種)	200.5 (活動変更の 組合せ)	0 (現在の活動 で十分)	0 (現在の活動 で十分)
モニタリング費用 (EUR/ha)	112.1	439.4 ⁽³⁾	55.3	157.9 ⁽⁴⁾
指標的保険費用 (EUR/ha)	38.7	38.7	36.7	36.7
合計費用(EUR/ha) (対売上総利益比)	345(35.2%)	679(69.2%)	92.0(5.3%)	195(11.3%)
合計費用(EUR/t) (対価格比)	150(20.3%)	295(40.0%)	10.2(4.5%)	21.6(9.5%)
(1) 条件: 地区内で50%のGM品種を栽培、農家内ではGM作物を栽培しない				
(2) 条件: 地区内で50%のGM作物を栽培				
(3) 5つの農家が協力して農家レベルの固定費用を分担すると仮定				
(4) 3つの農家が協力して農家レベルの固定費用を分担すると仮定				

6.3.3 モデル作物間の比較

異なるモデル作物に対する追加費用の影響を比較するために、費用の対価格比を使う。面積あたりの費用や収穫量あたり費用を使うと、収穫量や生産物価格が大きく異なるときに、状況を正しく伝えられない。売上総利益に対する割合にすると少しよくなるが、この研究で使用する売上総利益には、自家労働の費用と土地費用が含まれないため、労働投入量の違いや土壌と気候に関する必要条件が考慮されていない。図9に、3つのモデル作物の農家タイプ1~4について、0.3% (ナタネ) および1% (トウモロコシとジャガイモ) の基準値での、価格に対する費用の割合を示している。図示した数値はすべて表46、表48、表49、表51から取ったものである。

3つの作物の間には明らかな違いがある。ナタネでは追加費用が高く(8.9%~41%)、有機認証種子を生産する農家2と保存種子を利用する農家3と農家4での費用はもっとも高い。ナタネ生産の目標基準値(0.3%)は他の2つの作物(1%)より低く、これが農家2、農家3、農家4に影響している。保存種子を用いる農家3と

農家4は、保存種子の使用をやめて、認証種子を購入しなければならないだろう。種子生産の基準値0.3%は、食用および飼料用生産の基準値1%に置き換えることもできる。それによって追加費用はかなり減少するが、播種のための種子を新たに購入する費用よりはまだまだずっと大きい。トウモロコシ生産では追加費用による影響は小さく、その範囲は非集約的栽培地域にある有機栽培農家4での4.5%から、集約的生産を行う農家1の9.5%までである。ナタネに比べて相対費用が小さいのは、栽培面積が大きいこと、収量が高いこと、そして目標基準値が高いことによる。トウモロコシでは、ナタネの場合とは逆に、一般栽培での追加費用のほうが有機栽培での追加費用より大きい。その理由は、有機栽培農家は農業の変更をすべて導入する必要がないためである。さらに一般栽培農家では収穫後管理で必要となる変更の費用が含まれていないため、推定費用が過小に評価されている。ジャガイモ生産では収量が高いために追加費用はさらに小さく、1.4%から3.2%の範囲である。

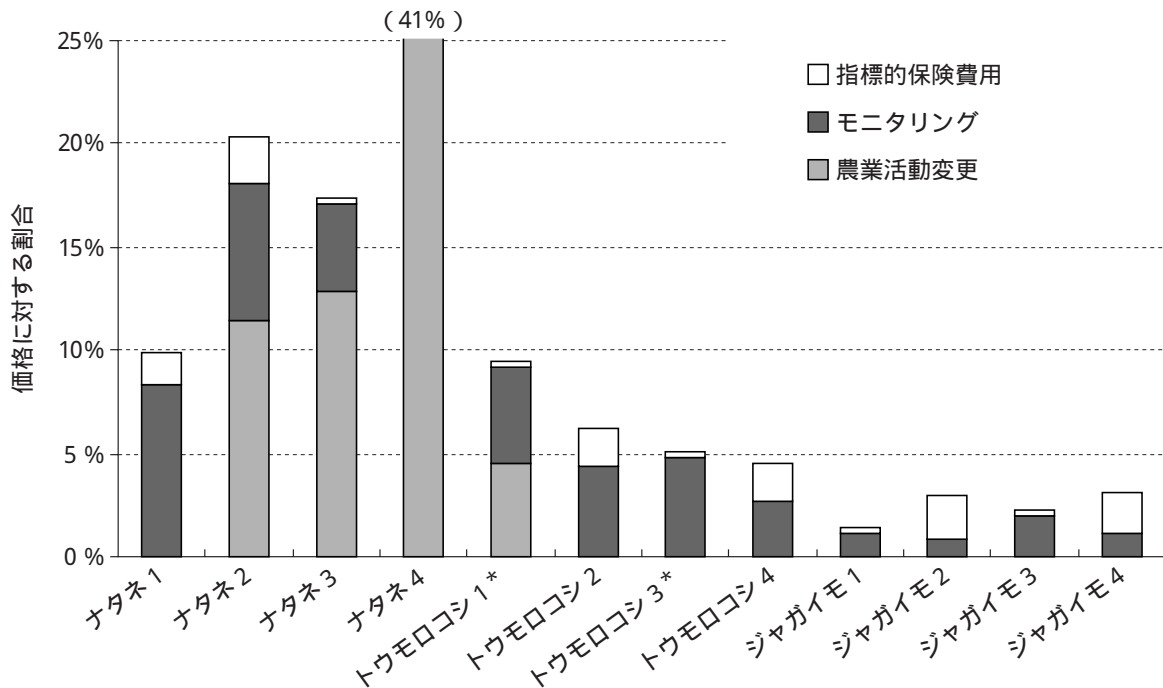


図9 3つのモデル作物の農家タイプ1~4における対価格比での費用比較 (目標基準値: ナタネ0.3%、トウモロコシとジャガイモ1%) (* 一般栽培トウモロコシについては、収穫後管理の変更費用は含まれない)

6.3.4 助成金の影響

上で示したすべての計算には、受けることのできる助成金が含まれている。助成金は農家収入に組み込まれて、その重要な部分となっており、社会に対する正の外部効果が内部化された収入と見ることができる。けれども面積あたりの費用を助成金を除く売上総利益に対する比率で見ると、多くの場合、売上総利益に対する割合としての追加費用の影響は劇的に拡大する。図10に各モデル作物の農家1～4での費用を、助成金を含まない場合と含む場合の、売上総利益に対する割合として示す。助成金には面積支払いと有機生産助成金(該当する場合のみ)があり、付録に示されている。

ナタネでは違いが大きく、とくに農家3と農家4の費用は、農家3では売上総利益の18.1%から74.5%まで、農家4では27%から118%まで拡大する。ほかのナタネ農家とトウモロコシ農家1、3では、この割合はほぼ2倍になる。これらの農家のすべてで助成金は農家の採算に大きな役割を果たしており、売上総利益から助成金を差し引くと、売上総利益は劇的に低下する。トウモロコシ農家2ではこの影響は小さく、3つのジャガイモ農家では助成金がまったくない(農家1と農家3)か、あるいは影響はごく小さい(たとえば農家2では114ユーロ/haの助成金を受け取るが、売上総利益の合計は5000ユーロ/ha以上である)。

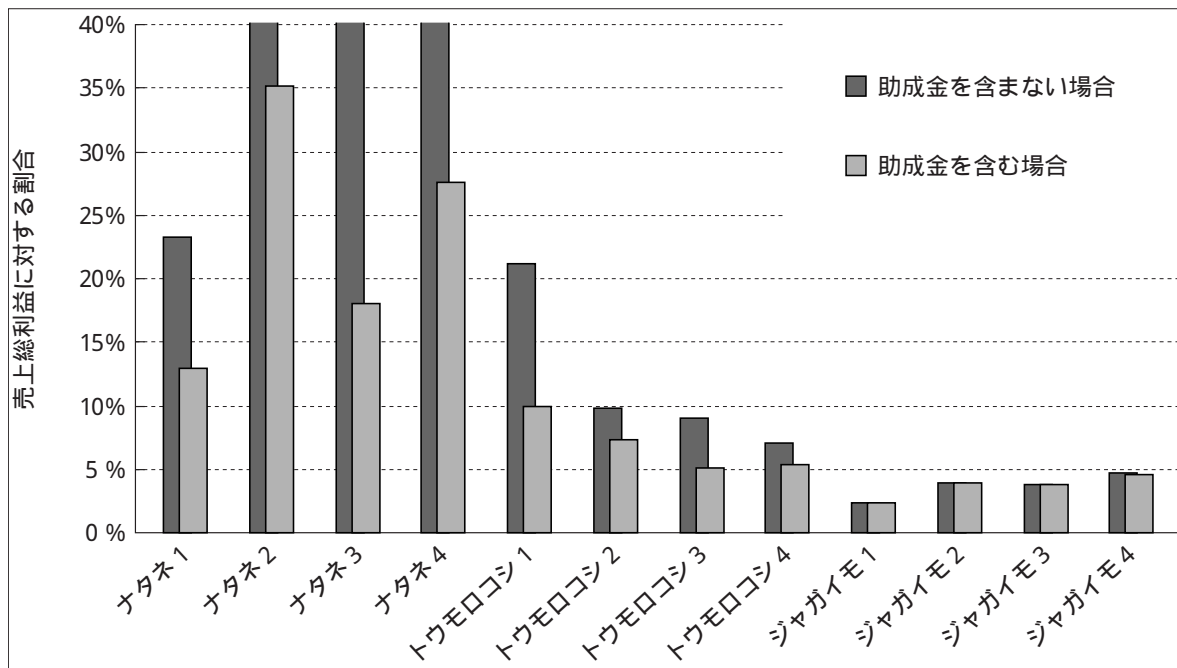


図10 各モデル作物の農家タイプ1～4における費用の、助成金を含む場合と含まない場合の対売上総利益比(目標基準値: ナタネ0.3%、トウモロコシとジャガイモ1%)

7 総合的な結論

第2章から第6章までに示した結果から、以下のよう
な結論が得られる。この研究で示す結果は、いくつもの
仮定に基づいており、また一部はコンピュータ・シミュ
レーションを用いて得たものであることを、ここでもう
一度強調しなければならない。これらの結果は、異なる
農業活動を、混入を抑制する効果に関して比較すること
には利用できるが、定められた混入レベルを判定するに
は正確さがたりない。このため、これらの結果を解釈す
る際には注意が必要であり、ある程度までしか一般化で
きない。また、費用に関しては、需要の変動や市場
価格の変動が、農業の中での GM 作物の拡大にもなっ
て発生すると思われるが、この研究においてはまったく
考慮されていない。したがって、将来の市場価格の予測
や GM 作物と非 GM 作物への需要の予測には、これら
の結果は利用できない。

この研究では、GM 品種を使用しない一般栽培と有機
栽培とに注目して、非 GM 作物を生産しようとする際
に必要なと考えられる追加費用を検討した。多くの
場合、示された農業活動の変更と追加費用は一般栽培農
家や有機栽培農家に直接かかってくる。農業の変更提
案が GM 生産者の側に関係する場合も、費用は非 GM
生産者側の負担とみなしている。繁殖力のない GM 品
種を利用したり、導入遺伝子を(花粉では伝達されない)
葉緑体ゲノムに入れたりすることで、導入遺伝子を封じ
込める可能性は考慮していない。

各作物および農業タイプについて得られた結果は、
「GM 作物と非 GM 作物が欧州の農業景観で共存する
ことができるか」という問いにはケースバイケースの回
答しかないと示している。農家の構造、栽培と収穫
後の処理のほか、各作物の特性も考慮しなければならない。
適用される基準値のレベルは、これによって許容で
きる混入率が決まるため、きわめて重要である。GM 作
物と非 GM 作物の共存にかかわる費用は、基準値のレ
ベルを下げると、劇的に増大する。

7.1 各作物についての結論

7.1.1 種子用ナタネの生産

- 対象とした農家タイプと設定した農業活動に関する
限り、10%の低い GMO シェアでも、混入は0.3%
を超えるだろう。対象とした農家タイプのすべてで、
混入の程度を大きく低下させることが、50%の
GMO が存在する場合だけでなく10%の場合におい
ても可能と思われる。これは、おもに境界部の管理
と休閑期の播種によって、自生ナタネの問題を最小
にできるためである。研究の結果は、0.1%未満の
混入数値を達成することは、ほとんどの農家で可能
であるが、さらに高い費用が必要になることを示し
ている。
- 有機栽培農家は、おもに雑草管理の効果が小さいこ
とが原因で、混入の影響を受けやすいと思われる。
ただし、これらの農家においても、混入の程度を下
げるための効果的な手段がある。
- 認証種子生産では、目標基準値を0.3%とし、その
地区で50%の GMO が栽培されていると想定する
と、合計費用(農業活動を変更する費用、モニタリ
ングと予想される保険の費用を含む)は、価格の10%
(一般栽培)から20%(有機栽培)に相当するだろ
う。費用は、各農業活動変更の費用、モニタリング
費用および指標的保険費用に由来する。もっと低い
基準値(0.1%)を目標とした場合には、一般栽培
農家での費用は、農業活動の変更による費用の増加
によって価格の25%まで増加するが、有機栽培農家
での費用は高い基準値のときと変わらないだろう。
種子の費用は農業投入の費用のわずかな部分にすぎ
ないため、その費用は種子の買い手に転嫁すること
になるだろう。
- 保存種子を使用して食用と飼料用の作物を生産する
農家では、0.3%の基準値に適合することは容易で
はない。もっとも影響の大きい有機栽培農家では、
追加費用は生産物価格の17%および41%に相当す
る。どちらの農家も農業活動を変更するための費用
が合計費用の大部分を占める。費用が高つくため、
これらの農家では保存種子の利用をやめざるをえな
いだろう。農家が食用と飼料用の作物を栽培する場
合、0.3%の基準値がその農家に適用される理由は、
農家が保存種子を使っていることだけである。農家
が保存種子の使用をやめれば1%の基準値が適用さ
れるだろう。その結果、農業活動変更の費用は著し
く減少し、合計費用もかなり小さくなる。もっと低
い0.1%の基準値の場合は、一般栽培農家はこの低
い混入率は達成できず、また有機栽培農家でも、生
産物価格の半分近くに相当する費用になる。
- ハイブリッド種子生産のシミュレーションを作成
し、最悪の場合のシナリオを記述した。同一の条件
下では、非ハイブリッド種子の生産の際の混入レベ
ルはハイブリッド種子の場合より低いと予測され

る。このため、非ハイブリッド種子の生産のための最適な活動を作成した場合は、ここで提案した農業活動と比べて違いが出てくるかもしれない。

7.1.2 飼料用トウモロコシ子実の生産

- トウモロコシに関しては、研究の対象とした一般栽培農家では、地区内の GMO トウモロコシが50%ではなく10%である場合にも、混入の問題が生じるだろう。一方、有機栽培農家では、その農業活動を変更しなくても GM 混入が1%未満のトウモロコシの生産が可能だろう。ごく低い混入レベルは、農業活動を変更したとしても、農家タイプのいずれでも達成はきわめて困難であると思われる。
- 圃場でのおもな混入源は GM トウモロコシからの他家受粉であり、その影響は隔離距離だけでなく、GM トウモロコシと受入れ側の非 GM トウモロコシとの相対的な圃場面積によって決まる。小規模農家あるいは圃場区画の小さい農家への影響が大きい。トウモロコシ圃場中の自生トウモロコシは重要な混入源ではない。
- 他家受粉に加えて、収穫後のトウモロコシ子実の取扱いが、予想される混入の主要な原因となるが、これを回避することは難しい。新たな貯蔵設備への投資か、センター集荷や貯蔵組織の再編成によってこの状態は改善できるだろう。(特定のトウモロコシ品種に特化した)「生産地区 (production islands)」を形成することによって、非常に低い混入レベルを満たすことが可能になる。
- トウモロコシの場合には種子の純度が大きな役割を果たす。純粋な種子を購入できれば、混入レベルをかなり減少させることができる。
- 追加費用 (活動の変更の費用、モニタリング費用、指標的保険費用を含む) は価格の4%から9%になる。収穫後管理の変更から生じる費用はこの計算に含めていないが、その追加費用が買い手に転嫁された場合には、トウモロコシのような商品作物にとっては非常に大きな価格上昇になるだろう。追加費用の大部分はモニタリングシステムのためのものであるので、生産面積を増加したり、複数の作物に固定費を振り分けたりすることなどでこれらの費用を減らすと、合計の費用も大きく低下するだろう。

7.1.3 食用ジャガイモの生産

- ジャガイモの例は、作物の特性が混入の可能性にか

なり影響することを示している。1%の基準値は、研究対象とした農家タイプのすべてで、現在の農業活動を変えずに達成可能であると考えられる。必要なモニタリングシステムと保険の費用は、売上総利益の2%から5%、あるいは価格の1%から3%と、比較的にかさい値となる。

- 意外なことに、この作物についても、地区内で栽培されている GMO の割合が25~50%の場合には、0.1%の混入レベルは達成が困難である。

7.2 総合的結論

- 混入レベルに影響する共通的な要素が確認された：
 - ・ 種子の純度
 - ・ 作物の品種 (同型接合/異型接合、ハイブリッド品種)
 - ・ 分離 (空間的分離/時間的分離 (開花期の違いなど))
 - ・ 自生植物の管理
 - ・ 圃場サイズ
 - ・ 圃場配置
 - ・ 収穫物の取扱い方法 (収穫、貯蔵、乾燥、輸送)
- 一般に、非常に低い混入基準値 (ここでは0.1%) は、達成が非常に困難であると考えられる。対象としたすべての事例で、0.1%未満に混入のレベルを下げることは非常に難しく、費用が高つくか、あるいは実行不可能である。
- 収穫物の取扱いにかかわる問題は圃場内での混入の問題よりも解決が難しいと考えられる。一般に、新たな機械類と貯蔵設備への投資、あるいは作業の全面的変更が必要となり、農家の運搬・貯蔵業務にも影響がある。
- この研究で適用した基準値を考えると、GM 作物と一般栽培作物または有機栽培作物を同じ農家が同時に作ることは現実的なシナリオではないだろう。ナタネの場合は GM 自生ナタネが重要であり、ナタネ種子生産者は GM 作物の種子が混入するリスクを避けるため、同一の農家内での GM 作物の栽培をやめることになるだろう。またトウモロコシとジャガイモの場合には、農家内での共存によって収穫物の取扱いがさらに難しくなる。
- 同じ地区内で GM 作物と非 GM 作物が共存することは可能な場合もあるが、想定する基準値によって異なる。研究の結果によれば、地区内で栽培される GMO の割合が10%、50%のどちらであっても、ごく低い基準値は満たせない。とくに種子生産につい

ては GMO 無栽培地区の設置が課題となるだろう。

- 農家タイプの一部では、農家単位のレベルで農業活動を変更するだけで混入を抑制することができる。だが、農家タイプの多くでは、近隣農家どうしの、少なくとも部分的な協力が必要であり、また一般的にそれがもっとも効果的な対策となる。
- 有機栽培農家が混入率をうまく下げられるかどうかは、作物の種類と、農地および各圃場の面積によって決まる。後者は一般栽培農家にも影響する要因であるが、EUの有機栽培農家の平均面積25haは一般栽培農家の平均面積(19ha)より大きいため、その影響はさらに大きい。ただし、各加盟国での状況はそれぞれ大きく異なっている。一般に、有機栽培農家は一般栽培の作物との分別を実施しているため、収穫物の取扱いは問題にならないと考えられる。とはいっても、混入レベル「0%」が達成できるかどうかには、大きな疑問がある。ナタネに関しては、有機栽培農家では自生ナタネの除去が難しいため、混入の問題は一般栽培農家よりも大きい。トウモロコシでは自生植物は問題とならないため、この研究で扱った有機栽培農家では混入の問題は少ない。これはジャガイモ生産の場合も同様である。
- 実施中の分別システム(もちトウモロコシや高エルカ酸ナタネなどの分別システム)は、変更を加えなければ、GM作物の混入を最小化する目的には適さない。一般的には、これらの分別システムが保証する基準値はGM作物に対して設定される基準値ほど厳しくない。また、これらの分別システムのいくつかでは、安価で速く簡易な検出手法(もちトウモロコシの場合ならヨウ素染色)が使われているが、GM品種を検出、識別するための現在の方法は、まだこのような特徴を持っていない
- モニタリングのための費用は非常に高いが、その一部はGMO分析の費用が高いことによる。将来は、より迅速に、より安価に、収穫物中のGMOを検出、定量する方法が開発されると期待される。
- 非常に低いレベルのGM成分をモニタリングし、さまざまな遺伝子型を同定することは、種子純度を測定し、また農作物にGMOが含まれないことを確認するための必須条件である。PCR分析(DNAの検出)は、質的・量的な分析のために選択できる手法であり、免疫測定法(タンパク質の検出)は、圃場への混入の有無を短時間で判定するために使われる。GMO分析は新たな分析法(器材の小型化、マ

イクロチップ、マイクロ流路システム)の開発、および遺伝子目録と専用情報システムの確立によって改良されていくだろう。

- サンプリングの手順と分析の手法については、さらに正確な信頼性の高い方法にするため、欧州レベルと国際レベルでの検証と統一が必要である。欧州レベルでは、欧州GMO検査機関ネットワークが分析手法の検証を行っている。
- この研究で検討したGMOは、いわゆる入力形質を示すものを想定した。導入されるGM品種がおもに付加価値特性を持つものなら、そのGM作物には割増し価格がつけられるだろう。これは市場原理によるGM品種の分別につながり、それがGM品種側の開花時期を変える動機になるなど、非GM品種生産の分離が促進されるかもしれない。けれども、いくつかの理由で、この効果は小さいだろうと思われる。第一に、純度を上げるための限界費用が増大するため、基準値のレベルが高くなるだろう。このような分別システムは、4%の基準値が適用されているもちトウモロコシの分別システムと比べてみることができる。第二に、農業上、多くの変更が考えられるが、それらは他家受粉と種子分散の可能性を減らすだけであり、その一方で、非GM作物へのGM混入の他の原因は残されたままである。
- 研究から引き出されるもう一つの結論は、重要なデータが入手できないということである。混入の可能性に関して、ナタネ、トウモロコシ、ジャガイモおよび他の作物の遺伝子流動に関する実験データを得るための新たな研究が必要である。
- EUで取引されているロットでの種子混入のレベルが現実にどの程度かという情報(いくつかの加盟国検査機関からは利用可能になってきている)をさらに得ることが、ここで示したようなシミュレーションのために必須である。また、ナタネ種子についてこの文書で記述したような研究は、トウモロコシ種子でも、共存が種子生産にどのように影響するかをさらによく理解し、種子生産の基準を変更するための情報を提供するために役立つだろう。
- 経営面のデータに関しては、この研究では農業上の変更案のいくつかについて費用を推定していない。たとえば、分離距離を拡大するための費用を推定するには、農地の別の利用法を分析しなければならない。収穫後管理の変更には、供給チェーンの次の段階として物流の変更が含まれるかもしれない、やはり

非常に複雑な解析につながるだろう。このことは、
経済的な部分に集中し、おそらく事例数を減らして
もっと詳細にまで踏みこむような、一つの農家の経

営構造全体を考慮した研究がさらに必要であることを示している。

付録 I : ナタネ生産農家の経営状況

表53 英国におけるナタネ種子生産農家の経営状況
出典：Nix & Hill,2000, White,2000⁴⁾; 独自の計算

地域	英国	英国
作物	一般栽培 認証種子	有機栽培 認証種子 ³⁾
農家タイプ	ナタネ 1	ナタネ 2 , ナタネ 2 '
収量 (t/ha)	3.50	2.3
価格 (EUR/t)	369.2	738.4
総収入 (EUR/ha)	1292.2	1698.32
変動費用 (EUR/ha)		
種子	129.7	n.a.
肥料	160.1	
作物保護	205.2	
機械その他の費用	251 ²⁾	
変動費用合計 (EUR/ha)	746	1152.12
売上総利益 (EUR/ha)	546.2	546.2
面積支払い (EUR/ha) ¹⁾	435.0	435.0
売上総利益 + 支払い (EUR/ha)	981.2	981.2
<p>1) 面積支払いには、価格補償支払いと1992/93年度の共通農業政策 (CAP) 改革で導入された休閑プログラムのための支払いとが含まれる。</p> <p>2) 機械その他の費用は、ドイツの一般栽培農家のデータを使って算出した。</p> <p>3) 有機栽培認証種子については、一般栽培認証種子と比較して100%の価値割増しを想定した。この価格割増しは、欧州の有機栽培認証種子生産者の代表との検討によって確認した。この割増しは、農薬を使わないことなどによる費用の増大に由来している。したがって、これはおもに費用によって決まる割増しであり、消費者に販売される有機生産物の割増しが今のところ短期の構造的な供給不足に強く影響され、生産費用の長期的な差を必ずしも反映していないとは大きく違っている。このため、売上総利益は、一般栽培種子生産と同じであると想定して、変動費用の合計は、総収入と売上総利益の差として計算した。したがって、有機栽培生産については費用を分類できない。</p> <p>4) Nix, J. & Hill, P. (2000) Farm management pocket book. Edition 31. (農場管理手帳。第31版) Wye: Imperial College; White, D.(2000) 私信 NIAB (英国農業植物研究所) 種子認証データ。</p> <p>n.a. データなし</p>		

表54 中部ドイツとフランスにおける一般栽培と有機栽培によるナタネ生産農家の経営状況

出典: KTBL(1997, 1998, 1999)、CETIOM(1999)、Michelsenら(1999)に基づく独自の計算、OffermannとNieberg(2000)⁷⁾

地域	ドイツ ¹⁾	フランス ²⁾	ドイツ
作物	保存種子使用 ナタネ一般栽培	保存種子使用 ナタネ一般栽培	保存種子使用 ナタネ有機栽培
農家タイプ	ナタネ3	(ナタネ3)	ナタネ4、4'
収量 (t/ha)	3.14	3.51	2.04
価格 (EUR/t)	231	152.5	277
総収入 (EUR/ha)	725.3	535.1	527 ³⁾
変動費用 (EUR/ha)			
種子	36.3	-	63
肥料 ⁴⁾	134.3	84.1	16
作物保護 ⁴⁾	136.5	120.1	186
機械	186.3	-	65
その他の費用	64.8	78.6	
変動費用合計 (EUR/ha)	558.1	282.9	330
売上総利益 (EUR/ha)	167.1	252.3	197
面積支払い (EUR/ha) ⁵⁾	529.6	562 ⁶⁾	530
有機農業への支払い (EUR/ha)	-	-	114
売上総利益 + 支払い (EUR/ha)	696.7	814.3	841

- 1) KTBL (1997, 1998, 1999) のデータの平均
- 2) CETIOM (1999) が公表した1999年分の情報
- 3) 60%を有機栽培ナタネとして、40%を一般栽培ナタネとして販売 (Michelsenら(1999))
- 4) 有機栽培農家では肥料と作物保護についての諸費用を合計した。
- 5) 面積支払いには、価格補償支払いと1992/93年度に共通農業政策 (CAP) の改革で導入された休閑プログラムのための支払いとが含まれる。
- 6) Teyssier(1999)による情報
- 7) Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL)(農業技術・構造協会)(1997)Standarddeckungsbeiträge(標準利益率)1996/97.Darmstadt http://www.ktbl.de/manag/stdb/stdb_97.htm ; KTBL(1998) Standard-deckungsbeiträge 1997/98. Darmstadt http://www.ktbl.de/manag/stdb/stdb_98.htm ; KTBL(1999) Standarddeckungsbeiträge 1998/99. Darmstadt http://www.ktbl.de/manag/stdb/stdb_99.htm ; Michelsen, J., Hamm, U., Wynen, E. & Roth, E.(1999) The European market for organic products: growth and development.(有機栽培生産物の欧州市場:成長と発展)In: Organic Farming in Europe: Economics and Policy.(欧州の有機農業:経済と政策)Vol.7. Stuttgart: Department of Farm Economics, University of Hohenheim.(ホーエンハイム大学農家経済学部); Offermann, F.とNieberg, H.(2000) Economic performance of organic farms in Europe.(欧州における有機栽培農家の経営状況) In: Organic Farming in Europe: Economics and Policy. Vol.5. Stuttgart: Department of Farm Economics, University of Hohenheim.

付録Ⅱ：トウモロコシ子実生産農家の経営状況

表55 フランスにおける一般栽培と有機栽培によるトウモロコシ生産農家の経営状況
 出典：Les 4 saisons Sud-Adour, 2000, Enquete Unigrain, ITAB

地域	フランス Pau ¹⁾	フランス Vienne ²⁾	フランス Pau と Vienne ³⁾
作物	トウモロコシ一般栽培 (集約的生産)	トウモロコシ一般栽培 (非集約的生産)	トウモロコシ有機栽培
農家タイプ	トウモロコシ 1	トウモロコシ 3	トウモロコシ 2、2' トウモロコシ 4、4'
収量 (t/ha) 価格 (EUR/t)	10.15 98.5	10.06 108.1	9.0 228.7
総収入 (EUR/ha)	999.8	1087.5	2058.3
変動費用 (EUR/ha)			
種子	123.1	159.2	133.4
肥料	186.1	165.1	160.1
作物保護	96.5	87.4	21.3
その他の費用 ⁴⁾	143.8	67.0	444.4
変動費用合計 (EUR/ha)	549.4	478.7	759.2
売上総利益 (EUR/ha)	450.4	608.8	1299.1
面積支払い (EUR/ha) ⁵⁾	506.0	488.9	426.9
売上総利益 + 支払い (EUR/ha)	956.4	1097.7	1726.0
<p>1) 1997～1999年の Pau 地域の平均 (農家タイプ 1 に対応)</p> <p>2) 1997～1998年の Vienne 地域の平均 (農家タイプ 3 に対応)</p> <p>3) 1995～1999年のフランスの平均 (農家タイプ 2、2'、4と4' に対応)</p> <p>4) 情報源が異なるため、「その他の費用」には地域によって異なる項目が含まれる：Pau 地域では収穫費用、 降雹 (ひょう) 保険費とかんがい費用、Vienne 地域では企業の作業費、また、有機栽培によるトウモロコ シ生産では収穫、乾燥、灌漑の費用が含まれている。</p> <p>5) 面積支払いには、価格補償支払いと1993/94年度の共通農業政策 (CAP) 改革に関連して導入された休閑プ ログラムのための支払いとが含まれる。</p>			

付録 III： ジャガイモ生産農家の経営状況

表56 ドイツにおける一般栽培と有機栽培によるジャガイモ生産農家の経営状況
 出典：KTBL(1997、1998、1999)、Michelsen ら(1999)に基づく独自の計算、Offermann と Nieberg(2000)⁴⁾

地域	ドイツ Brunswick	ドイツ Brunswick	ドイツ 北西海岸地域	ドイツ 北西海岸地域
作物	加工用 ジャガイモ 一般栽培 ¹⁾	加工用 ジャガイモ 有機栽培	早生 ジャガイモ 一般栽培 ¹⁾	早生 ジャガイモ 有機栽培
農家タイプ	ジャガイモ 1	ジャガイモ 2	ジャガイモ 3	ジャガイモ 4
収量 (t/ha) 価格 (EUR/t)	41.9 92	25.1 276	27.2 177	16.3 531
総収入 (EUR/ha)	3855	66982)	4814	83722)
変動費用 (EUR/ha)				
苗	566	979	1159	2005
肥料 ³⁾	182	22	146	19
作物保護 ³⁾	188	379	164	387
機械類	379	265	387	145
その他の費用	265		145	
変動費用合計 (EUR/ha)	1580	1645	2001	2556
売上総利益 (EUR/ha)	2275	5052	2813	5816
有機農業への支払い (EUR/ha)	-	114	-	114
売上総利益 + 有機農業への支払い (EUR/ha)	2275	5166	2813	5930

1) KTBL (1997、1998、1999) のデータの平均
 2) 95%を有機栽培、5%を一般栽培のジャガイモとして販売 (Michelsen ら (1999))
 3) 有機栽培農家では肥料と作物保護についての諸費用を合計した。
 4) Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) (1997) Standarddeckungsbeiträge 1996/97. Darmstadt [http://www.ktbl.de/manag/stdb/stdb 97.htm](http://www.ktbl.de/manag/stdb/stdb%2097.htm) ; KTBL (1998) Standard-deckungsbeiträge 1997/98 [http://www.ktbl.de/manag/stdb/stdb 98.htm](http://www.ktbl.de/manag/stdb/stdb%2098.htm) ; KTBL(1999) Standarddeckungsbeiträge 1998/99. [http://www.ktbl.de/manag/stdb/stdb 99.htm](http://www.ktbl.de/manag/stdb/stdb%2099.htm) ; Michelsen, J., Hamm, U., Wynen, E. & Roth, E.(1999) The European market for organic products: growth and development. In: Organic Farming in Europe: Economics and Policy. Vol.7. Stuttgart: Department of Farm Economics, University of Hohenheim. ; Offermann, F. & Nieberg, H. (2000) Economic performance of organic farms in Europe. In: Organic Farming in Europe: Economics and Policy. Vol.5. Stuttgart: Department of Farm Economics, University of Hohenheim.

表57 英国における一般栽培と有機栽培によるジャガイモ生産農家の経営状況
 出典：Nix, J. & Hill, P. (2000)

地域	英国 East Anglia	英国	英国 South West England
作物	調理用ジャガイモ 一般栽培	ジャガイモ 有機栽培	早生ジャガイモ 一般栽培
農家タイプ	(ジャガイモ1)	(ジャガイモ2)	(ジャガイモ3)
収量 (t/ha)	42.5	25.0	22.5
価格 (EUR/t)	131.4	410.5	221.6
総収入 (EUR/ha)	5584	10262	4986
変動費用 (EUR/ha)			
苗	1034	1231	1149
肥料	361	164	287
作物保護	739	-	328
機械類	656	821	328
その他の費用	656	821	369
変動費用合計 (EUR/ha)	3446	3037	2461
売上総利益 (EUR/ha)	2138	7225	2525
出典：Nix, J. & Hill, P. (2000) Farm management pocket book . Edition 31. Wye : Imperial College			

MISCELLANEOUS PUBLICATION OF NATIONAL
INSTITUTE FOR AGRO-ENVIRONMENTAL SCIENCES

No. 27

EDITORIAL BOARD

Chairman

Tsuyoshi Mitamura Executive Director

Vice Chairman

Hiroshi Seino Director, Department of Research Planning and Coordination

Editors

Shin-ichi Nagaoka Head, Division of Documentation and Information

Yousay Hayashi Director, Department of Global Resources

Mitsunori Oka Director, Department of Biological Safety

Hideo Imai Director, Department of Environmental Chemistry

Masashi Uwasawa Director, Natural Resources Inventory Center

Masako Ueji Director, Chemical Analysis Research Center

本誌から転載・複写する場合は、当所の許可を得てください。



農業環境技術研究所資料 第27号 平成15年9月30日発行

発行 独立行政法人 発行者 理事長 陽 捷行
農業環境技術研究所

〒305 8604 茨城県つくば市観音台3 1 3

電話 029 838 8197 (情報資料課広報係)

September, 2003

MISCELLANEOUS PUBLICATION
of
NATIONAL INSTITUTE FOR AGRO-ENVIRONMENTAL SCIENCES
No.27

Scenarios for co-existence of genetically modified,
conventional and organic crops in European agriculture

by European Commission

Translated by Toshihiro Kadosawa and Keiko Nakatani

Division of Research Coordination
Department of Research Planning and Coordination

National Institute for Agro-Environmental Sciences

Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8604

JAPAN