

# 農薬と生物多様性は共存できるのか？ ～リスクベースのアプローチはさらなる進化を必要とする～

(独) 農業環境技術研究所 有機化学物質研究領域

永井 孝志

## 1. はじめに： 安全は絶対的なものか？

農薬のリスク管理では、農薬登録制度における、多くの安全性試験による事前評価によって安全性を担保する、という部分に大きな重点が置かれてきた。この中で、生物多様性を含む生態系保全については、水産動植物の被害防止に係わる登録保留基準の設定によって、安全性の評価が行われている。

ところで、現在の一般的な安心・安全に対する考え方では、「安心」と「安全」は分けて考える必要があり、「安心」は主観的、心理的なもの、「安全」は科学的、客観的なものである、とされている。しかし、

**本当に「安全」は科学的事実であり、不変的なものなのであろうか？**

安全か否かの判断は、化学物質によって引き起こされると推定される被害の大きさ（リスクの大きさ）を何らかの基準に当てはめることによって行われる。しかし、その判断基準は（国によって、時代によって）一定ではないので、全く同じリスクを持つものであっても「安全」であったりそうではなかったりする。例えば農薬については、残留農薬に係わるポジティブリスト制の導入により、多くのかつて「安全」だった食品が、中身に変化がないのに「安全」では無くなった。極端な例では、実際のリスクは年々減少してきているのに、基準値の改訂（もしくは新たな基準値の設置）によって、ある時点で「安全」から「安全でない」に突然評価が変わる、という可能性もある（図 1）。この場合、基準値の超過のみを見ていれば、年々キケンになっていると錯覚し、「不安」を引き起こしてしまうだろう。何をもち「安全」とするかの基準は、その時代背景、社会、文化によって変化し、必ずしもその線引きは科学によってのみ定義されるもので

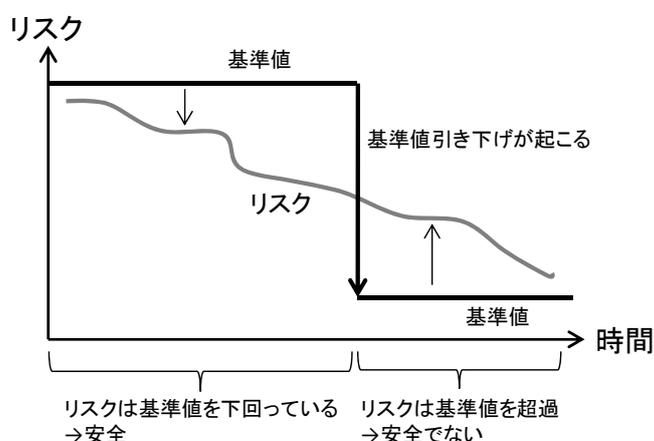


図 1. 「安全」とリスクの時系列変化例の概念図。実際のリスクは年々下がっているのに、ある時点で「安全」から「安全でない」に突然評価が変わる

はない。よって、安全性評価をくぐり抜けた農薬は絶対「安全」なわけではなく、その時点における一定の範囲内の安全性が担保された状態である、と考えられる。このように、

**科学によって評価できるのは「安全」ではなく「リスクの大きさ」である。**

本稿では安全か否か、ではなく「リスクの大きさ」で考えるリスクベースのアプローチを用いて、農薬と生物多様性との関係を解き明かす。その際、生態系の価値判断や生態系保全にかかるコスト等の兼ね合いをどう考えるかについても考察し、タイトルにある「農薬と生物多様性は共存できるのか？」という問いかけに答えるためのヒントを提示してみたい。

## 2. あらゆる場面で「リスクの定量化」が求められる

前節で「安全」と評価されたものであってもリスクはゼロではなく、「安全でない」と評価されたものであってもリスクが大きいとは限らない、ということを示した。安全か否かという二者択一ではなく、リスクを定量化することで、以下に例示する今日の環境保全上の様々な疑問に対する答えを提示することができる。

### (1) ネオニコチノイド系殺虫剤でトンボやミツバチがいなくなる？

近年、赤トンボやミツバチの減少が報告されており、この原因がネオニコチノイド系殺虫剤にある、という説が見うけられる。しかしながら、経年的なリスクの上昇とトンボやミツバチの減少が一致するといった因果関係はこれまで全く報告されていない。農薬の影響はゼロではないと考えられるため、安全性評価の考え方では管理に限界がある。そこで必要になるのはリスクの定量化である。現在と、ネオニコチノイド系殺虫剤が登場する以前の有機リン系殺虫剤を大量に使用していた時代との間で、トンボやミツバチに対するリスクを比較し、さらに経年的なリスクの変化を追うことによって、因果関係を解明することが可能となる。もし、リスクが過去に比べ相対的に減少傾向にあるならば、過去の農薬による影響をくぐり抜けてきた昆虫たちが、現在壊滅的な打撃を受ける、ということは考えにくい。

### (2) フェンチオンは使用しない方が良いのか？

2003年に厚生労働科学研究で取りまとめられた「ウエストナイル熱媒介蚊対策に関するガイドライン」に対して、日本生態学会は2005年、ウエストナイル熱媒介蚊の防除に際して有機リン系殺虫剤フェンチオンの使用回避についての要望書を関係省庁に提出した<sup>1)</sup>。この中で、フェンチオンの使用は生態系、特に鳥類に対して大きな影響があるため、ウエストナイル熱の対策としての蚊の防除に使用しないことを求めている。フェンチオンが鳥類に影響する懸念が示されているが、現時点で安全性評価の枠組みには鳥類の影響評価は入っていない。この場合でも、リスクを定量化して比較することが有効である。フェンチオンの現在の鳥類に対するリスクを定量化し、さらにフェンチオンの代わりに用いられることになる殺虫剤のリスクを推定して、比較することで代替によるリスクの変化がわかる。これにより、フェンチオンを使用しないことで本当に鳥類へのリスクが低減するのか、どの防除体系を採用すれば効率的に鳥類へのリスクを低減させることができるか、ということが見えてくる。また、そもそもウエストナイル熱は鳥にも感染しやす

く、流行により多数の野鳥が死亡したことが報告されている。農薬使用による鳥類へのリスクとウエストナイル熱による鳥類へのリスクも比較しなければならない。

### (3) 環境保全型農業で生物多様性は守れるか？

近年、農地が多い里地里山等において、農薬等の不適切な使用により生物多様性が劣化している事が指摘されている。このような生物多様性低下への懸念に基づき、農林水産省では環境保全型農業として農薬の使用等による環境負荷の軽減に配慮した持続的な農業を推進している。しかしながら、このような環境保全型農業の普及は増加傾向にあるものの、減農薬による品質・収量の低下および生産コストの増大等を理由として、全体としては低い普及率に留まっている。

一方、「今後の環境保全型農業に関する検討会」報告書（農林水産省 2008）によると、

- ・環境保全型農業の取り組み効果を定量的に表す科学的な指標が未開発であることなどから、環境保全型農業の推進による生物多様性の保全効果に関する知見が十分蓄積されていない
- ・当面の間は農薬の使用量を指標として目標を設定することが適切である。しかし、生物多様性の保全については評価方法の確立を加速化することが望ましい

と、生態系管理対策の効果の定量的な評価が課題であると提起されている。

現時点の環境保全型農業では、農薬使用量（使用回数）の低減が優先的に行われているが、この科学的根拠は非常に薄弱である。そもそも生態系保全を目的とした場合、低減の対象は「農薬使用量」ではなく、農薬使用に伴う「生態リスク」でなければならない。過剰な減農薬の推進は農業生産のリスクを増大するため、本来の環境保全型農業の目的である「持続的な農業生産」と矛盾する。したがって、生態系保全と農業生産の関係を定量的に解析し、最適な管理基準を導くことが望ましい。ここでもやはり農薬の生物多様性に対するリスクを定量的に評価することで、「農薬の使用量を減らす」「より低毒性の農薬に切り替える」「農薬の流出防止対策をとる」などの対策をとった場合のリスクを予測・比較することが可能となり、農業生産への負の影響を抑え、効率的にリスクを減らす対策を選択することが可能となる。次節にて具体例を紹介する。

## 3. 農薬の生態リスクの定量化の研究事例

農水省の報告書では、生態系へのリスクの定量的な指標は未開発であると認識されているが、近年のリスク科学の発展は急速であり、研究レベルでの取り組みは多く存在する。リスクの定量化を行うためには、毒性や曝露などの不確実なパラメータを一つに決定せずに分布として表現し、確率論的な評価を行うのが有効であると考えられている。ここでは筆者らが行った、水稲用除草剤シメトリンを例に確率論的アプローチを用いた水生生物に対するリスクの定量化を行った研究事例<sup>2)</sup>を紹介する。

化学物質などのストレス要因に対する生物の感受性は一般的に種によって異なり、その違いを統計学的に表現したものが、種の感受性分布（Species Sensitivity Distribution, SSD）である<sup>3)</sup>。経験則により、多数の生物種の感受性は対数正規分布に適合することが知られており、図2のように累積確率分布で表現される。欧州では、SSDの5パーセンタイル値に相当する濃度（5%の種が

影響を受ける濃度、逆に言えば95%の種が保護される濃度)をHC5(5% Hazardous Concentration)と表現し、これを無影響濃度とすることで、水生生物保全のための水質基準値の設定の根拠として用いている。また、SSD法は生態系への影響を濃度との関数として表すことができるので、定量的なリスク評価方法として有用である。農薬の環境中予測濃度(Predicted Environmental Concentration, PEC)がわかると、影響を受ける種の割合(Potentially Affected Fraction, PAF)が計算できる。ここで、PAFは生物多様性にどれだけ影響があるか、という定量的な「多様性影響度指標」として位置づけられる。

曝露評価では、環境省が定めた水産動植物の被害防止に係わる登録保留基準の策定に使用されるPECの計算モデルをベースとして、PECが全国の地域毎にどの程度ばらつく可能性があるのかをモンテカルロシミュレーションを用いて解析した(図3)。すなわち、まずPEC算定に必要なパラメータ(水田面積、河川流量、農薬の普及率)が地域的にどの程度ばらつくかを解析し、それぞれを確率分布として表現する。次に、各パラメータの分布からランダムサンプリングされた値を用いてPECを算定する、という過程を10000回繰り返す。この得られたPECの分布は地域的なPECのばらつきを表している。

実際のシメトリンのデータを用いて解析し、毒性と曝露のばらつきをそれぞれ確率分布として重ね合わせた(図4左)。そして、ある割合の種が影響を受ける濃度レベルの曝露を受ける確率を計算し、Joint Probability Curve(リスクカーブ)として表した(図4右)。この例では5%の種

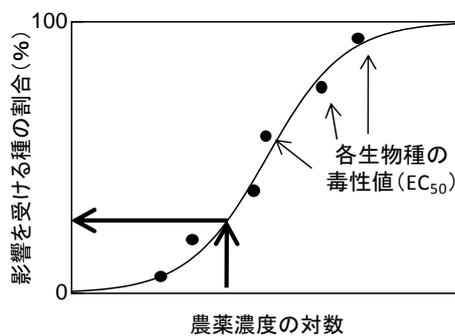


図2. 種の感受性分布の概念図

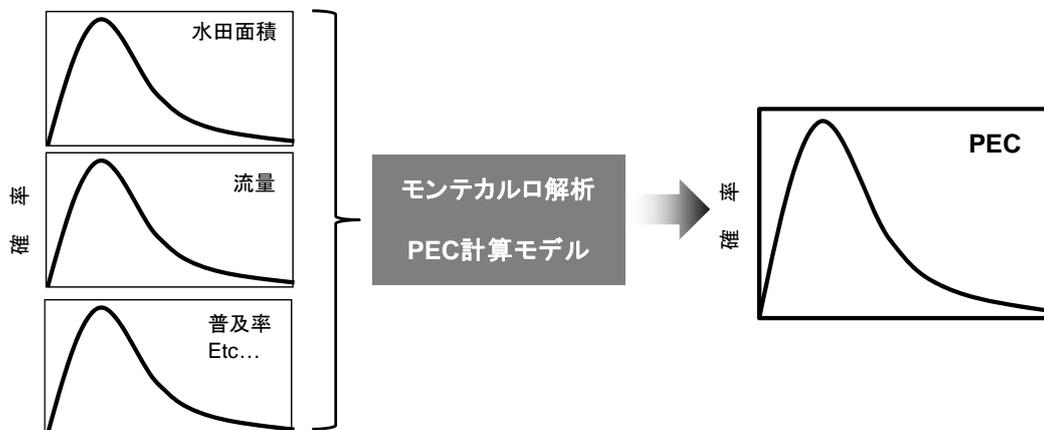


図3. モンテカルロシミュレーションによるPECの分布解析の概念図

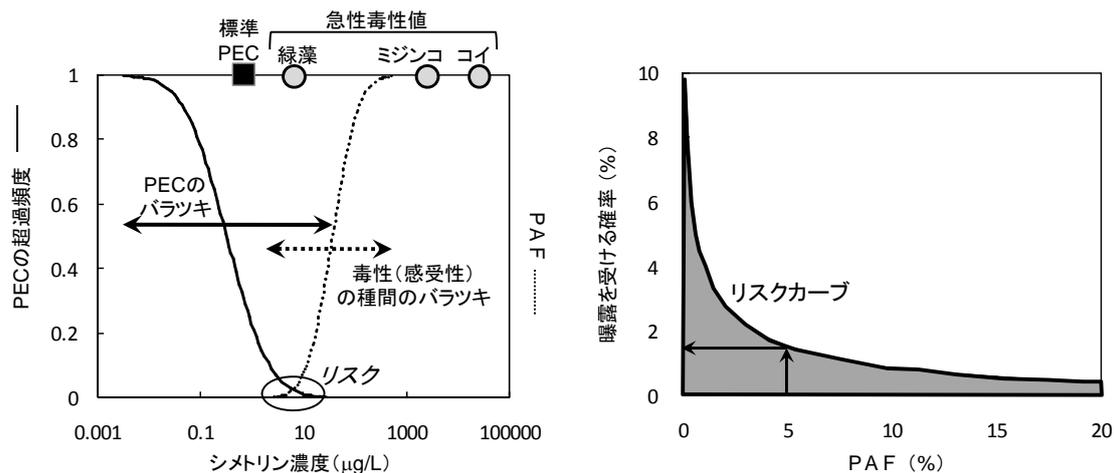


図4. 除草剤シメトリンの確率論的リスク評価。PECと感受性の分布（左）とリスクカーブ（右）、塗りつぶした部分の面積（期待多様性影響）が0.3%となる

が影響を受ける確率は1.5%と計算された。また、リスクカーブの下の面積は全国平均的なPAF（これを「期待多様性影響」とする）となり、0.3%と算出される（全国平均的に種の0.3%が影響を受ける可能性があるという意味づけられる）。

このようにリスクを確率として定量化することで、リスク管理への活用が可能となる。例として、水管理と農薬使用量減との間でのリスク低減効果を比較する。上記の期待多様性影響0.3%というリスクは、除草剤散布後の止水期間として3日を想定した場合である。農薬の流出対策として止水期間を3日間から7日間へと変更すると、期待多様性影響は0.3%から0.08%へ減少すると試算された。止水期間は3日のままで、シメトリンの投入量を半分とした場合、期待多様性影響は0.3%から0.09%へ減少すると試算された。つまり、

**農薬を減らさなくても水管理によって、農薬を半減する以上のリスク低減効果を達成できる。**

この場合農薬の量は減らさないで農業生産への影響も変化せず、単純に農薬を減らすことだけを考えるよりも効率的である。

#### 4. 農薬のリスクはどこまで減らせばよいのか？

安全か否かという二者択一的な考え方に比べ、リスクを定量化することによって、より科学的で効率的なリスク管理につながっていくことを示してきた。また、近年のリスク科学の発展により、生物多様性へのリスクを定量化することも可能となっている。つまり、科学的なリスク評価を用いた意思決定が有効になりつつある。ところが、このような「農薬と生物多様性」という単独の関係を扱ったリスク評価には限界が存在する。リスクを定量化すると、「安全」と評価されたものでもリスクはゼロではないことがわかるが、

**ゼロではないリスクは一体どこまで減らせば良いのだろうか？**

この問いには、これまでのリスク科学、リスクを定量化するだけでは答えを出すことはできない。なぜなら、これまでのリスク評価には、価値判断やコストとのトレードオフが含まれていな

いため、最適な管理水準が導き出せないからである。

具体的な問題点を二つ挙げると：

(1) 我々が守りたい生態系とはいったい何なのか？

(2) 誰がそのコストを負担するのか？

という議論が抜け落ちていることである。

(1) 我々が守りたい生態系とはいったい何なのか？

人間の手を加えない原生的自然を守りたいのか、それとも水田のような人間の手を加えた結果できた二次的自然を守りたいのか、を明確にする必要がある。ただ単に「生物多様性」という言葉を使った場合、それが曖昧である。例えば耕作放棄地を考えた場合、放置すれば遷移が進み原生的自然は増え、生物多様性も増えるが、水田のような二次的自然は減る。また、現在の水田生態系は過去数十年来農薬を使ってきた、ということも含めた人為的攪乱の結果である。それを守るには今まで通り農薬を使って人為的攪乱を起し続ける必要がある。さらに、農薬を使用しない粗放的農業を行うと、農地が二次的自然から原生的自然に近づき、また別の二次的自然が誕生する。どの時点の自然を守りたいのかという価値判断を明確にしなければ、最適な管理戦略は見つからない。

また、農薬を減らして食料生産が落ち込めば、その分農地を増やすか食料輸入を増やさなくてはならない。外国では日本に輸出するために森林を切り開いて農地をしている。これは最大の生態系破壊であり、これを無視して日本の農地で生物が増えればよい、というわけにはいかない。これは、どこの生態系を守りたいのか、という価値判断が含まれる。ライフサイクルアセスメント (LCA) を用いた分析事例では、単位土地面積あたりでは有機農業の方が環境影響は小さいが、単位生産物あたりでは慣行農業の方が環境影響が小さいという結果が得られている<sup>4)</sup>。つまり、農地レベルでは食料生産と生物多様性のトレードオフが成立するが、地球レベルで考えればそういったトレードオフは存在しない。林 (2006) も、食糧需要の増大等を考慮すれば、単位生産物辺りの環境影響の小さい生産システム、すなわち集約的農業を採用する方が社会全体としての環境影響は小さくなると述べている<sup>5)</sup>。

(2) 誰がそのコストを負担するのか？

近年の生物多様性の減少要因としては、生息地の減少、乱獲、外来種、環境汚染、気候変動、放置などがあるが、中でも生息地の減少が最大の要因と見なされている<sup>6)</sup>。水田などの二次的自然を考えた場合、生息地、すなわち水田を水田として維持し続けることが、農薬によるリスクの低減よりも重要になる。このためには農業経営の安定化が欠かせない。耕作放棄地は年々その広がりが増している。農業経営が安定していれば農地は維持されるが、そうでなければ離農が増え農地は荒廃する。

環境リスクと農業経営リスクの関係はこれまであまり議論されてきていない。しかし、食品の安全安心や生態系保全という名の下に、農業環境リスクの低減策を進めるほど農家の経営リスクは増加する、というトレードオフが存在すると考えられる。例えば、生物多様性に配慮した農業を行うため、環境保全型農業を導入しようとするれば、その分高度な知識や技術が要求されコストもかかり、防除の失敗などのリスクも増加し、農業経営リスクの増加要因となる。単純に「農薬

は減らせばよい」というだけでは、農業のコストと農家の経営リスクは高まり耕作放棄を増やす結果となる。つまり、このような二次的自然の保全のためには、増加する農家の経営リスクをどのようにマネジメントしていくか、というところまで考えなければならない。ここでも食料生産と生物多様性の単純なトレードオフは存在しない。保全にかかるコストを無視して、生物が大事だから保全しよう、というスローガンを掲げるだけでは自然保護は回らない。

また、農業は産業であり、以前と比べ国際競争の下にさらされるようになった。補助金などの活用によりたとえ国内の農業生産が増えても、余分なコストのせいで国際競争力が落ちると価格で勝てなくなり、食料の輸入が増え日本の農業は衰退する。増大するコストを単純に補助金でまかなう、というやり方では日本の農業の国際競争力はますますそがれ、農業の衰退に拍車をかけるだろう。生態系保全は、その時々々の経済状況に左右されない長期的に回るシステムの構築が必要となるだろう。

## 5. 部分最適から全体最適へ システムとしての統合評価の必要性

前節で、単純に農薬を減らして生物多様性を保全をしようとしても失敗すること述べた。農業経営や食料生産など他の要素を無視して、生態リスク単独の部分最適化を行おうとしても、それぞれの要素間の相互作用があるため、システム全体としては上手く回らない。ではどうすればよいのか？上記のような農業システムを構成する要素間の相互作用を定量的に解析することによって、農業システム全体としての最適な管理基準の存在が見えてくると考えている。これは、農薬と生態系との単独の関係を扱ってきたこれまでのリスク科学では対応できないチャレンジングな課題となる。本節では今後のリスクベースのアプローチの進化の方向性を考えてみたい。

リスク評価のもともとの意味は科学を道具として用いる意思決定支援である。現時点で研究者（リスク評価者）にできることは、複数の農業システムの中から意志決定者（リスク管理者）が最適なシステムを選択できるメニュー表を用意することである（表1）。

表 1. 農業システムの意思決定のためのメニュー表のイメージ

	健康リスク	生態リスク	農業経営	食料生産	持続可能性
農業システム 1	A	C	A	A	A
農業システム 2	B	B	B	B	B
農業システム 3	A	A	C	C	C
...					

例えば、農業システム 1 では、生態系への影響は大きいですが、健康影響、農業経営、食料生産、持続可能性（エネルギー使用量など LCA 的な影響評価）については非常に優秀なシステムである。農業システム 2 では、すべてが中庸である。農業システム 3 では、健康影響や生態影響などリスク面を見ると優れているが、使用エネルギー量は増大し、農業経営と食料生産については劣る、ということになる。このような統合評価を行うと、それぞれの技術に一長一短があり、生態リスクだけを見ても上手くいかない、ということがわかる。つまり、どのシステムが一番良いとは一概に言い切れない。科学ができることは、このような統合評価の結果を記したメニュー表を

作るところまでである。そしてその後は、リスク管理者である意思決定主体が、メニュー表を見ながら社会経済的な状況を考慮して総合的に判断する、というステップになると考えられる。

意思決定主体は一つではなく、農地レベル、地域レベル、国レベルと分かれているため、それぞれの意思決定主体のレベルに応じたメニュー表を用意する必要がある。それぞれのレベルにおいて、メニュー表の項目である健康リスク、生態リスク、農業経営、食料生産、持続可能性、などを評価する。本稿では生態リスクの定量化手法を取り上げたが、他の項目についても定量的に評価し、農業システム毎に比較できる状況にする。価値判断の部分についても、望みの生態系毎にメニューを作ることによって選択肢を提示できる。これが将来的なリスクの統合評価のイメージである。

以上のことは、一言で表すとリスク・ベネフィット論と呼ばれている考え方である。ところで、「日本の国民は感情で動く」、「リスク・ベネフィット論など日本人にはなじまない」、などと言われて久しい。ところが、

**総合的なリスク・ベネフィット論による意思決定は誰でもできるし、実際に誰でもやっている。**

例えば、レストランでメニュー表を見て、注文する品物を決める行為はリスク・ベネフィットのバランスを考慮した総合的な意思決定である。メニューには各種注文品のコスト（値段）、リスク情報（カロリー、塩分など）、ベネフィット情報（写真や説明）が記載されており、どの注文が一番良いかは一概には言い切れない（表2）。そして、その時の健康状態や経済状態、食べたいものの好みなどを総合的に判断して応じて注文を決める。レストランでメニュー表なしに、出てくるものの詳細も値段もわからない状態で注文を決めることは難しいだろう。また、値段（コスト）のみを判断材料にする人はいないし、カロリーや塩分（リスク）のみを判断材料とする人もいないだろう。つまり、誰もが統合評価を用いて、部分最適ではなく全体最適を考慮して意思決定を行っているのだ。リスク評価とはメニュー表を作る行為に等しい。リスク管理においても、リスク評価なしに管理対策の意思決定を行うことは難しいのである。

表2. レストランでの意思決定のためのメニュー表のイメージ

品物	値段	カロリー	塩分	ベネフィット
塩あんかけ 鉄板焼きそば	599円	692 kcal	5.2 g	カリカリ焼きそばの上にエビと豚肉のあんかけたっぷり
オムマヨハンバー グ・エビフライ	599円	990 kcal	3.4 g	人気者の3つがそろった欲張りプレート
海鮮とろろ丼	799円	601 kcal	7.1 g	山芋はタンパク質吸収を高め、体力維持、滋養強壮に効果的
...				

ガストのメニューを参考に記載

## 6. おわりに

本稿では、「農業と生物多様性は共存できるのか？」という問いに始まり、単一の正解が存在し

ない、根本的に考える必要のある「問いかけ」を複数投げかけた。これらの「問いかけ」に明確な答えを用意することは現時点で難しいが、考えるヒントは「リスク評価」にある、ということを手張してきた。農薬の生物多様性に対するリスクを評価することは可能となったが、それだけでは最適な管理方法を導くには不十分である。よって、問いへの答えを用意するにはリスクベースのアプローチはさらなる進化を必要としている。ここでは進化の方向性を示すものとして、「統合評価」という未来形を提示した。この進化を成し遂げるには、リスク評価の科学への参入者と理解者（支援者）の増加、研究者のさらなる学際化が求められるだろう。

#### 文献

- 1) 日本生態学会 (2005) ウエストナイル熱媒介蚊対策に際しての殺虫剤フェンチオンの使用回避についての要望書. [http://www.esj.ne.jp/esj/ESJ\\_NConsv/2005fenthion.html](http://www.esj.ne.jp/esj/ESJ_NConsv/2005fenthion.html)
- 2) 永井孝志、稲生圭哉、堀尾剛 (2008) 不確実性を考慮した農薬の確率論的生態リスク評価：水稲用除草剤シメトリンのケーススタディー. 日本農薬学会誌, 33(4), 393-402
- 3) Posthuma L, Suter G, Traas TP (2001) Species Sensitivity Distributions in Ecotoxicology (Environmental and Ecological Risk Assessment), Lewis Pub, Boca Raton, USA
- 4) Basset-Mens C, van der Werf HMG (2005) Scenario-based environmental assessment of farming systems: the case of pig production in France. Agriculture, Ecosystems and Environment, 105, 127-144
- 5) 林清忠 (2006) 農業生産システムの環境影響評価 —OR と LCA—. オペレーションズ・リサーチ, 2006(5), 268-273
- 6) 松田裕之 (2008) やりなおしサイエンス講座 07 なぜ生態系を守るのか? NTT 出版

