

農薬使用による水生生物への生態リスクの全国的な変動の見える化

農研機構農業環境研究部門

永井 孝志

はじめに

農薬は安定した食物生産に必要な資材として広く使用されているが、水田で使用された農薬が排水に伴い河川に流出した場合等に、本来農薬の標的ではない水生生物への悪影響が懸念される（この悪影響の程度と発生可能性を「生態リスク」と定義）。現在わが国では、農薬取締法に基づく「水域における生活環境動植物の被害防止に係る農薬登録基準」（以降、農薬登録基準）の制度により、農薬の水生生物に対するリスク評価に基づいた個別農薬の基準値の設定が順次進められている。また、2018年の改正農薬取締法による再評価制度の下、基準値の再評価も始まっている。

農薬全体の使用量は減少傾向にある一方で、農薬の種類は逆に増加しており、農薬の「少量多様化」が進んでいる。種類が少ない時代には個別の農薬のリスクを評価すれば十分であったが、「少量多様化」時代においては一つ一つの農薬のリスクは低くても多種類の複合影響の懸念が増加し、リスク評価のあり方にも変化が起きている。実際に、茨城県桜川の農薬モニタリング調査によると、田植え後の水稲用農薬の使用ピーク時に最大で30種類以上の農薬の有効成分が同時に検出されている（Iwafuneら2010）。

このような状況において、個別の農薬のリスクを評価するのみでは生態リスクの全体像は把握できなくなっ

ている。そして、過去から現在までのリスクの推移や農薬の代替によるリスク全体の変化を見ることなしに特定の農薬だけを問題視し、その農薬さえやめればよいといった世の中の風潮には大きな疑問を抱かざるを得ない。すなわち、農薬全体の生態リスクを定量的に示してその変化を可視化することにより、どこで何をどう変えれば農薬全体の生態リスクを効率的に低減できるのかを示すことができると考えられる。

さらに大きな動きとなっているのが、2021年に農林水産省が策定した「みどりの食料システム戦略」であり、「化学農薬の使用量（リスク換算）を50%低減」という政策目標が掲げられている。このリスク換算では、各有効成分の使用量をリスク係数（許容一日摂取量別に3グループに分けられ決定）で補正して合計する手法が提案されているが、生態リスクについては現時点で未検討である。

以上のような背景の下、筆者は以下のような問いに答えるための生態リスク評価手法を開発してきた。

- ・現在の農薬全体の生態リスクはどれくらいか？
- ・少量多様化によって農薬全体の生態リスクはどう変化したか？
- ・地域毎の生態リスクの違いはどのくらいか？
- ・環境保全型農薬の生態リスク低減効果はどのくらいか？

本記事ではこの手法の具体的な適用例として、日本で使用されている主要な水稲用農薬67種による生態リスク

を全国の河川350地点で評価し、さらに1990年から2010年まで5年ごとの推移を評価した結果を紹介する。

1. 複数農薬による生態リスクの定量的な評価方法

化学物質による生態リスクを定量的に評価するために有用な手法が種の感受性分布である（農業環境技術研究所2016）。河川や湖沼などの水圏生態系には多種多様な生物が生息しているが、農薬の毒性は対象となる生物種によって極端に異なることが知られている。しかしながら、環境中に生息する全ての幅広い生物種に対する毒性試験を行って、毒性データを得ることは現実的には不可能である。一方で経験則により、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-1のように環境中濃度と影響を受ける種の割合の関係を一つの曲線で表現できるようになる。農薬の濃度がわかると影響を受ける種の割合が計算でき、この指標は生物多様性（種の多様性）にどれだけ影響があるか、という定量的な「生物多様性影響度指標」として位置づけることができる。また、種の感受性分布を農薬に適用する場合には、除草剤では藻類やウキクサ等水生植物に対する毒性が特徴的に高いため、一次生産者とそれ以外で分布が分かれば、殺虫剤は節足動物に対する毒性が特徴的に高いため、節足動物とそれ以外で分布が分かると知られている。詳しくは日本語で記載された技

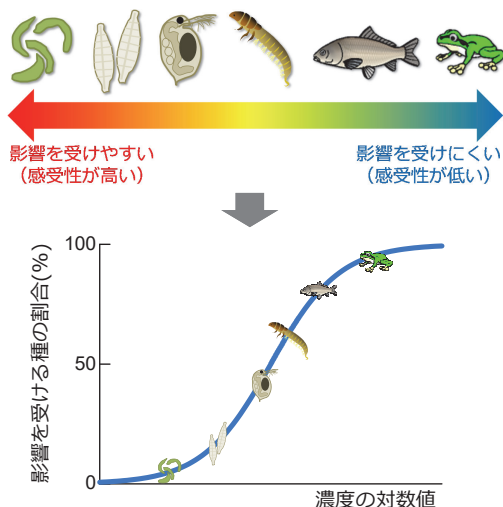


図-1 種の感受性分布の概念図。6種の生物を農業によって影響を受けやすい順番に並べ、それぞれの種の毒性値に従って対数正規分布曲線に適合させた例を示す（注：この図はあくまで概念的な説明であり、生物種に対する感受性の順序は農薬の作用機作などにより大きく変化する）。

Risk Assessment of Pesticides)」である (https://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/pub2016_or_later/laboratory/niaes/manual/079666.html からダウンロード可能)。本ツールは Microsoft Excel をベースとしており (図-2)、手持ちの環境中濃度を G 列のセルにそれぞれ入力すると、生態リスクの指標である影響を受ける種の割合の値が C2 のセルに表示され、その判定が表示される。主な水稲用農薬 68 種の SSD のパラメータ (Nagai 2016) がすでに入力されているため、必要な情報は濃度のみである。今後、解析可能な農薬数は増やす予定であり、さらに濃度予測モデルを内蔵することで、農薬のラベルにある使用方法などの情報を入力するだけでリスク評価ができるような改良も予定している。

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
	影響を受ける種の割合 (%)	判定	計算結果が出力			環境中濃度を入力				
1	除草剤	10.1								
2		リスク中								
3										
4	分類	農薬名	作用機作	対数平均	対数標準偏差	対数標準偏差の作用機作平均	濃度 (µg/L)	TU	SumTU	PAF_MoA
5		ベンスルフロンメチル	B	5.27	3.84	3.430	0.034	0.000	0.001	0.024
6		イマズスルフロン	B	6.70	3.16		0.181	0.000		
7		ピラゾスルフロンエチル	B	4.44	3.48		0.040	0.000		
8		シクロスルフアムロン	B	5.91	4.36		0.010	0.000		
9		プロピルスルフロン	B	7.29	2.79		0.056	0.000		
10		ピリミスルフアム	B	6.07	2.95		0.075	0.000		
11		ピリミゾバクメチル	B	10.96	0.25		0.052	0.000		
12		シメトリン	C1	3.53	0.85	0.797	0.312	0.009	0.010	0.000
13		ベンタリン	C3	9.66	0.75		13.091	0.001		
14		キノクラミン	D	3.79	0.76	0.762	0.513	0.012	0.012	0.000
15		オキサジアニン	E	4.20	2.85	3.135	0.245	0.004	0.006	0.053
16		ペントキサゾン	E	2.89	3.28		0.021	0.001		
17		オキサジアルギル	E	3.29	3.24		0.005	0.000		
18		ピラクロニル	E	4.88	3.32		0.081	0.001		
19		カルフェントラゾンエチル	E	4.52	2.98		0.037	0.000		
20		ピラリレート	F2	4.78	2.68	1.847	0.000	0.000	0.000	0.000
21	除草剤	ベンゾフェナップ	F2	5.15	1.45		0.008	0.000		
22		テフリルトリオン	F2	10.40	1.45		0.182	0.000		
23		ピラジキシフェン	F2	7.30	1.81		0.160	0.000		
24		プレチクロロール	K3	6.35	3.30	2.992	1.121	0.002	0.003	0.027

図-2 NIAES-CERAP を用いた除草剤の累積リスクの計算例

2. 生態リスクマップの構築

術マニュアルを参照願いたい (農業環境技術研究所 2016)。

生態リスクの定量的な評価法の活用については、2012年に本誌に掲載された筆者による解説記事 (永井 2012) を参照願いたい。近年推進されている環境保全型農業では、農薬の使用回数を指標としてこれを低減する努力がなされているが、本来は低減の対象は「農業使用」ではなく、農業使用に伴う「生態リスク」でなければならない。そこで、農業使用による生態リスクを防除体系毎に定量的に比較で

きるような新しいリスク評価手法を紹介した。

2018年に本誌に掲載された筆者による解説記事ですすでに紹介したように、種の感受性分布と既存の複合影響予測モデルを組み合わせることで、多数の農薬の複合影響も計算できる (永井 2018)。このような計算を簡便に行うために筆者が開発したのが「複数農薬の累積的生態リスク評価ツール: NIAES-CERAP (Institute for Agro-Environmental Sciences, NARO — Cumulative Ecological

農業使用は地域によって大きな違いがあるため、どこでどのような対策を行う必要があるかの判断のために、農薬の累積リスクの地域変動をマッピングすることが有用である。ここでは全国の河川流量観測地点 350 地点で累積リスクを評価した事例を紹介する (Nagai ら 2022)。解析対象は、NIAES-CERAP がカバーしている 68 農薬とした。この 68 農薬は日本で使用されている水稲用農薬使用量の主要な割合をカバーしている。まず、68 農薬の環境動態に関わる物理化学性や

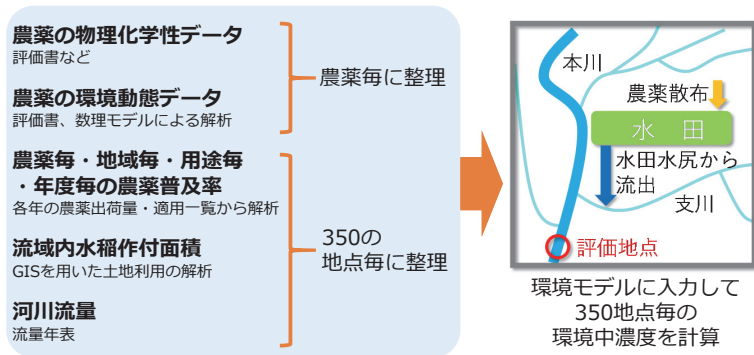


図-3 地点毎の環境中農薬濃度の計算方法の概要

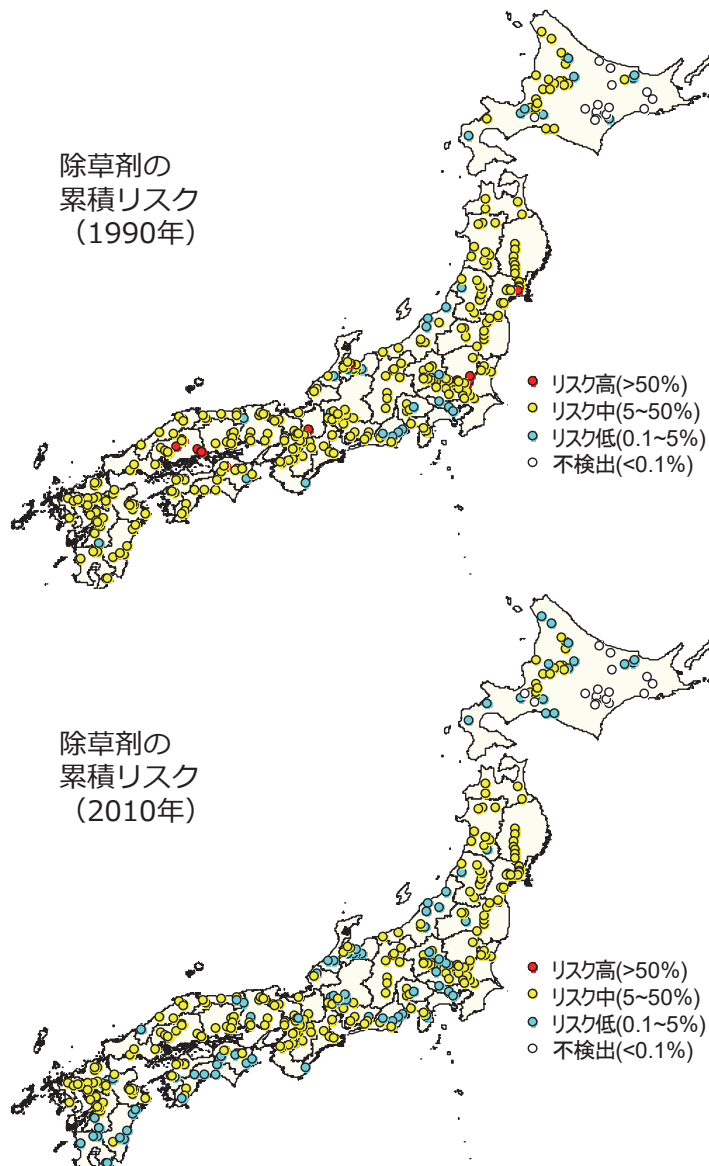


図-4 全国 350 地点における主要な水稲用除草剤 33 剤の累積リスクマップ (1990 年と 2010 年ベースの比較)。NIAES-CERAP では、累積リスクは影響を受ける種の割合に応じて暫定的に 4 段階で判定される (50% 超：リスク高, 5 ~ 50%：リスク中, 0.1 ~ 5%：リスク低, 0.1% 未満：不検出)。

水質汚濁性試験のデータを整理した。また、350 の評価地点毎に、農薬濃度に大きな影響を与える 3 つのパラメータ (流域内水田面積、河川流量、農薬普及率) についてのデータを整備し、環境省が定める農薬登録基準の設定で使用している環境中濃度予測モデルに入力して地点毎の農薬濃度を予測した (図-3)。これまでにこの手法による予測濃度と実測値はおおむね一致する結果が得られている (谷地ら 2017)。地点毎に各農薬の予測濃度を NIAES-CERAP に入力して累積リスクを計算し、日本地図上に表示した (図-4)。過去にわたる農薬出荷量や当時の適用一覧などの情報を用いて 1990 年から 2010 年までの累積リスクの推移を 5 年毎に調べた。

2010 年ベースの除草剤の生態リスク指標としての「影響を受ける種の割合」について、リスク高の地点は無く、リスク中が 243 地点、リスク低が 90 地点、不検出が 17 地点であった。1990 年ベースの場合にはリスク高が 13 地点、リスク中が 291 地点、リスク低が 31 地点、不検出が 15 地点であった。このように、地域特性を考慮した対策を立てる際にこのようなリスクマップの構築が有用となる。

また、殺虫剤と除草剤のそれぞれの生態リスクについて、1990 年から 2010 年まで 5 年毎の経年変化を図-5 に示す。殺虫剤の場合は 350 地点の中央値ベースで 23.6% から 1.8% に減少し、減少率は 92.4% となった。除草剤の場合は 350 地点の中央値

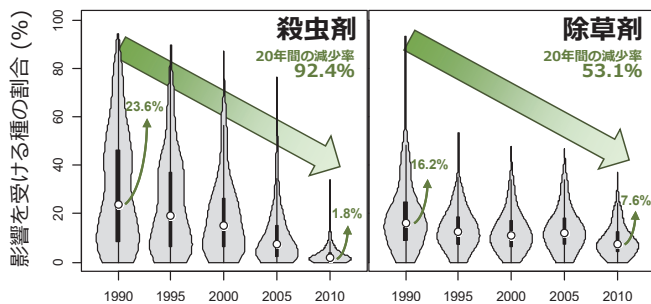


図-5 1990年から2010年にかけての5年毎の累積リスクの推移。350地点の累積リスクの分布はバイオリンプロットで示され、太い部分ほど多くの地点が集まっており、白丸が中央値、黒棒は全体の25%～75%が分布する範囲、黒線の下端と上端は最小値と最大値を示している。

ベースで16.2%から7.6%に減少し、減少率は53.1%となった。このように、20年の間にリスクが大きく低減してきたことが示されている。この大幅な低減は、農業メーカーによる低リスク農業の開発努力、水管理の徹底等による農業流出防止対策などの生産者によるリスク低減努力、国による農業登録制度の見直し(2005年からの「水産動植物の被害防止に係る農業登録保留基準」の設定)等によるものと考えられる。特に除草剤の場合は、トリアジン系除草剤の使用の減少、オキサジアゾンの一時登録失効、2006年以降の水稲用除草剤散布後の止水期間がそれまでの3-4日から7日間に延長されたこと、の3つがリスク低減に大きく寄与していた。水田での止水期間を4日から7日に延長することで除草剤の流出は1/2～1/10に抑えられることが知られている。

一方で、「みどりの食料システム戦略」で有機農業の取組面積の割合を耕地面積全体の25%に拡大するという政策目標が設定されているが、2010年の時点では0.4%にとどまっている。そのため、有機農業は1990年～2010年における生態リスクの低減にはあまり寄与していないと考えられる。

3. 野外生態調査による生態リスク評価の検証

例えば「影響を受ける種の割合が10%であった」という計算がなされた場合に実際の野外生態系で何が起るのか?といった生態学的な意味付けは重要な課題である。河川などの実際の野外環境の調査を行うことで化学物質の影響を調べる生態疫学的な研究はこれまで多数行われている。例えば、オランダの農業水路で261地点の生態リスクを評価して水路の生態調査のデータと比較を行った研究例があり、影響を受ける種の割合の値が10%を超えたあたりから種数に影響が見られている(de Zwart 2005)。

一方で、野外環境では地形や気象、流水などの物理要因、農業以外の化学物質や水質などの化学要因、他の生物との相互関係などの生物要因など、多種多様な要因による影響を同時に受けている。このようなマルチストレス環境であることに加えて対照区の設定が難しいこともあり、農業の生態影響を抽出することは困難であった。ところが、野外生物調査から農業の影響を検出するための河川生物指標が開発されるなど、近年の評価手法は大きく発展している。例えばSPEAR (Species At Risk) という生物指標は、全体の

個体数に対して農業によるリスクを受けやすい種の個体数の割合を%として指標化するものであり、この値が高いほど農業の影響が低い地点と評価される。ここでは筆者らが行った、実際の河川生態調査の結果を用いて除草剤の影響を評価する生物指標(SPEAR_{herbicides})と種の感受性分布を用いた除草剤の生態リスク評価の結果を比較した事例(永井ら 2023)を紹介する。

2016年から2017年にかけて、農業の汚染状況が異なる複数の河川において付着藻類の調査を行った。付着藻類は河川水生生物の中で除草剤の影響を受けやすいグループである。この付着珪藻の中でさらに除草剤の影響を受けやすい種の存在割合をSPEAR_{herbicides}として計算した。さらに、調査地点において推定した多種類の農業濃度をNIAES-CERAPに入力して生態リスクを算出した。その結果、SPEAR_{herbicides}と影響を受ける種の割合の値は統計的に有意な相関関係があり、除草剤の影響の可能性が示唆された。ただし、野外生態調査は非常に労力がかかり多地点のデータを蓄積することが困難であるため、今後は河川水中に漂うDNAの配列を解析することによってその環境中の生物相を評価できる「環境DNAメタバーコーディング分析」(環境DNA学会 2021)の活用など、効率的なデータ収集が求められる。

4. 成果の活用に向けて

ここまで紹介してきた手法により、複数の農薬使用からなる生態リスクの定量的な比較が可能となった。これにより、「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」などの管理対策を行った場合のリスク低減効果を事前に定量的に評価して、効率的な管理対策を選択できるようになる。また、河川水などの環境中農薬濃度のモニタリングは各地で行われているが、個別の農薬濃度の基準値との比較のみでなく、農薬全体としてのリスクの大きさを定量的に把握できるようになる。

リスクの定量的な評価は、便利であると共に様々な誤解も生みやすい。いわゆる数字が一人歩きする、という懸念である。累積リスクの評価結果を用いて適切な管理対策を考え、適切にコミュニケーションをとるためには、その意味を正しく理解する必要がある。累積リスクの現時点での最適な利用方法は、あくまでも効率的なり

スク管理対策を考える上で有用であるもので、値がいくつ以下であれば安全、いくつ以上なら危険、などの判断に用いるものではない。また、ある特定の農薬のリスクのみを評価して、何かの判断をすることは誤った判断につながる。ある特定の農薬の使用を低減しても、他の農薬に切り替えが起こった場合に、リスクが下がるのかどうかは明らかではなく、むしろ増えてしまう場合もある。農薬全体の累積リスクを評価することは、どんな管理をすればどのようなことが起こるのか、ということを考え適切な判断をするための手段である。

参考文献

- de Zwart D. 2005. Ecological effects of pesticide use in the Netherlands: modeled and observed effects in the field ditch. *Integr Environ Assess Manag*, 1, 123-134.
- 一般社団法人環境DNA学会 2021. 環境DNA: 生態系の真の姿を読み解く. 共立出版, pp281
- Iwafune T., Inao K., Horio T., Iwasaki N., Yokoyama A., Nagai T. 2010. Behaviour of paddy pesticides and major metabolites in the Sakura River, Ibaraki, Japan. *J Pestic Sci*, 35, 114-123.
- 国立研究開発法人農業環境技術研究所 化学物質環境動態影響評価リサーチプロジェクト 2016.【技術マニュアル】農薬の生態リスク評価のための種の感受性分布解析 Ver. 1.0
- 永井孝志 2012. 環境保全型農業と除草剤(農薬)の新たな生態リスク評価法. *植調* 45, 451-459.
- Nagai T. 2016. Ecological effect assessment of 68 pesticides used in Japanese paddy field using species sensitivity distribution. *J. Pestic. Sci.* 41, 63-14
- 永井孝志 2018. 複数農薬のミクスチャー環境下における生態リスクの評価法. *植調* 52(5), 12-17.
- Nagai T., Yachi S., Inao K. 2022. Temporal and regional variability of cumulative ecological risks of pesticides in Japanese river waters for 1990-2010. *J. Pestic. Sci.* 47, 22-29.
- 永井孝志, 稲生圭哉, 横山淳史 2023. 種の感受性分布による除草剤のリスク評価と河川生態調査による付着珪藻への影響評価との比較. *環境毒性学会誌* 26, 15-24.
- 谷地俊二, 永井孝志, 稲生圭哉 2017. 全国350の流量観測地点を対象とした水田使用農薬の河川水中予測濃度の地域特異性の解析. *日本農薬学会誌* 42, 1-9.