

持続的な害虫制御に向けた化学的防除 の新たな役割

日本曹達株式会社 小田原研究所
創薬生物研究部 山本 敦司
Atsushi Yamamoto

はじめに

「持続的な農業に貢献するこれからの害虫制御のあり方」を議論する上で次のビジョンが浮かんだ。それは、「持続的に農業生産者に儲けていただき、消費者は美味しく食べようという Win-Win の総合戦略」であり、食糧の安定生産をも目指している。このビジョンを達成するための多くの施策の1つに「化学的防除」があげられるが、その資材である農薬を取り巻く情勢は日々変遷している。特に国内外の農薬登録に対する規制強化の影響に伴い、総合的病害虫・雑草管理（IPM）が目的とする「人の健康に対するリスクと環境への負荷軽減」に化学的防除がより近づく情勢となってきた。そこで、農業生産者と消費者が Win-Win となるビジョンへ

の化学的防除の貢献に関して SWOT 分析を行った結果、次の2課題が浮上した（図1）。

まず、開発的課題で、「持続的に新しい殺虫剤をいかに探索・開発していくか」という創出に関するものである。次に、普及的課題で、「持続的に登録のある殺虫剤をいかに上手に使用していくか」という運用に関するものである。この2課題の解決の糸口を探るためには、SWOT 分析の主要な要因を総合的に考慮することが重要であり、本稿では食糧需給と農薬の市場トレンド、国内外の農薬に対する規制強化の新たな動向とその影響、抵抗性マネジメント、農薬の生態影響リスク等を概説する。そして、害虫の体系防除の基幹となる考え方である総合的病害虫・雑草管理（IPM）の中での化学的防除、特に殺虫剤の将来にわたる新たな役割を提案する。

SWOT分析テーマ：持続的な害虫制御への化学的防除の貢献

	プラス要因	マイナス要因
内部環境	強み Strengths ・害虫に対する防除効果の確実性 ・企業の新農薬開発力 ・都道府県の普及技術力	弱み Weaknesses ・関係組織の連携の難しさ ・薬剤抵抗性発達 ・環境および生態影響リスク
外部環境	機会 Opportunities ・世界人口増加、食糧増産ニーズ ・農薬マーケット拡大のトレンド ・総合的病害虫・雑草管理／IPM	脅威 Threats ・国内外の農薬規制強化 - 国内の厳しい農薬行政 - EU新規則・規制の影響



【開発的課題】
→ 持続的に・・・、新しい殺虫剤をいかに「探索・開発」していくか？

【普及的課題】
→ 持続的に・・・、登録のある殺虫剤をいかに上手に「使用」していくか？

図1.持続的な害虫制御への化学的防除の貢献に関するSWOT分析と課題

食料安定供給ニーズと農業マーケットの増加

増加する世界人口に比べ耕作地面積は横ばいの見通しである。世界人口は2000年から2050年にかけて約60億人から約95億人に増加する一方、耕作地面積はこの期間で約15億haに留まる。そのため、食糧の安定供給ニーズが今後はより高くなると考えられる(図2)。実際に、2020年の世界の食糧需給は、今後とも穀物等の需要が供給をやや上回る状態が継続する見通しであり、食糧価格は2007年以前に比べ高い水準で、かつ上昇傾向で推移する見通しである(農水省,2011.2)。そのため、作物生産能力を向上させる必要があり、その技術の一環として病虫害雑草に対する防除効果が安定して高い農薬(化学的防除)のニーズ・期待はこれまで以上に高まると予測される。実際に、非食用含む世界の農業マーケットは拡大傾向にあり、2005年、2010年、及び2014年見通しで、それぞれ約361億ドル、442億ドル及び520億ドルに達する(Agrow,No.600,2010; AgriFutura,No.145,2012)。

農薬に対する規制強化とその影響

近年、国内外で農薬登録に関する規制が強化される動きがある。

日本では、4府省もの機関(農水省、環境省、厚生労働省、内閣府/食品安全委員会・消費者庁)が農業行政に係り規制が行われている。最近の農業行政の主な動きとして、無登録農薬取締りとマイナー作物登録に関する農取法改正(2003年施行)、リスク評価機関の食品安全委員会の設置(2003年)、ポジティブリスト制度の施行(2006年)、作物残留試験へのGLP制度導入(2011年施行)、作物残留試験ガイドライン変更「試験数増加」(2014年申請～)があげられる。さらに、農水省「農薬登録制度に関する談話会」でも、更なる規制強化が検討されている(安全性試験要求項目の増加、安全性評価手法の変更、定期的な再評価制度の導入)。また、企業側でも各企業において、また農業工業会を通じて情報提供を行い、農薬の安全使用の啓蒙活動を実施している。

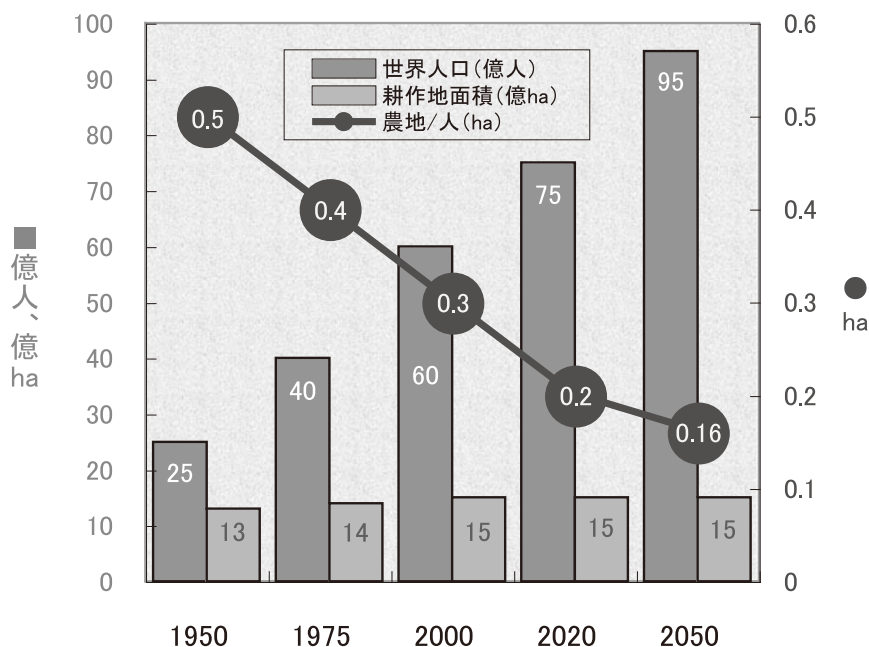


図2. 世界人口と耕作地面積の推移(1950～2050)

海外において、特にヨーロッパ各国では、EU 統合に際した指令 91/414/EEC に変わり、新指令 2009/128EC と新規則 (EC) No1107/2009 が施行 (2011 年 6 月 14 日の登録申請より適用される) され、農薬規制がさらに強化される (図 3)。新指令・規則での農薬の承認基準は次の 3 段階に増える。第 1 段階は、ハザードベースの絶対評価が有効成分を対象に実施される。そして、有害性カットオフ基準により「ヒトの健康に及ぼす影響」、「環境における運命と挙動」、「ミツバチ等の非標的生物に対する安全性」が評価される。この段階である一定の有害性があると判断された有効成分は原則使用禁止となる。第 2 段階は、これまでも実施されたリスクベースの相対評価が有効成分に対して実施され、有害性と暴露量で篩にかけられる。第 3 段階は、同一の病虫害防除に用いる農薬製品の比較評価が実施される。7 つの基準で評価され、より安全性の高い農薬製品を承認しそれ以外は「代替農薬 (候補)」とされ排除対象候補となってしまふ。

ヨーロッパ各国ではこれまでの旧指令によっても約 3/4 の農薬が市場から消え、新指令・規制によっても最大 33% の既存農薬が無くなることも想定された (EU 委員会提案、2008)。農薬数減少の実数は、実防除への影響も考慮されるため新指令・規制が施行されない限りわからないが、減少のトレンドは予測される。農薬規制強化の影響により、農薬数

の減少だけでなく農薬コストの上昇も予測され、その結果として害虫防除への支障や抵抗性発達のリスク増大も懸念される。その対応策をあらかじめ考慮する必要があり、それが化学的防除の新たな役割にも関連する。

新規殺虫剤の開発動向

上記のような世界的な新しい規制により、新農薬の開発は、病虫害雑草に対する防除効果だけでなく、人畜毒性、環境毒性、生態影響リスク、等の安全性に係わる指標に対し、より視点を向けたハードルの高い時代に入る。そのため殺虫剤開発では、広い殺虫スペクトルの殺虫剤を開発できる確率はより低くなり、狭い害虫スペクトルの選択性殺虫剤も含めた開発トレンドに変遷するだろう。このトレンドの中で、将来の農業生産現場では「減農薬」の考え方のみでは害虫制御が成り立たなくなる可能性もあり、「適切な農薬の安全使用を基軸とした体系防除」を選択肢として社会的合意を求める時代が来るであろう。

2010 年 7 月にオーストラリア・メルボルンで開催された国際農薬化学会議 (12th IUPAC/ICPC) では、殺虫剤関連の発表が各国から計 78 題報告された。その中で、62% の報告が新規剤開発・作用機構に関するものであり、企業各社や大学等の

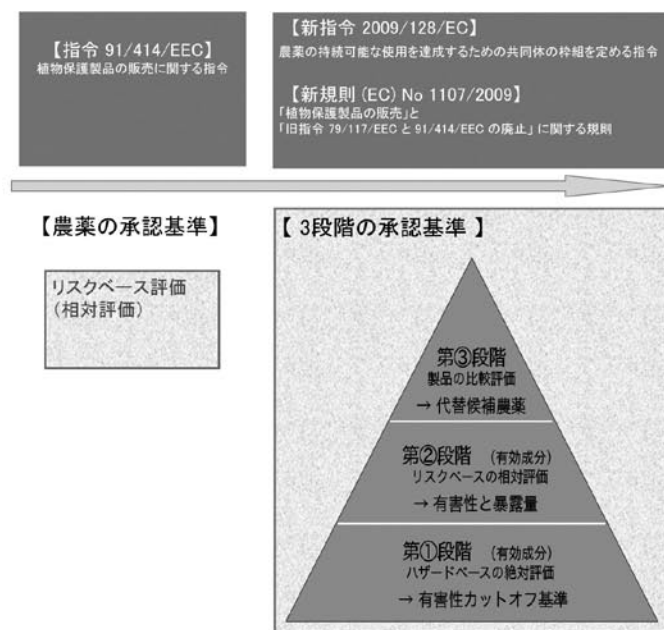


図3.ヨーロッパにおける農薬登録制度の変更ポイント、特に承認基準に関して

研究意欲が感じられた。企業各社では新しい農薬評価の変化に対応できる探索研究を開始しており、抵抗性の回避、低毒性、少ない処理量で高い効果、収穫物への残留量が少ない、散布時暴露量が少ない、生態影響もより少ないなど、より安全性の高い殺虫剤の開発を目標としている。今後は、狭い害虫スペクトルの殺虫剤（選択性殺虫剤）の開発も進むであろうし、製剤型や施用法を工夫し薬剤処理時の環境暴露量がより少なくなる剤型の開発も進むであろう（種子処理、粒剤や灌注剤の土壌処理、微粒剤F、等）。

日本における殺虫剤の有効成分の開発動向を殺虫スペクトルの点から概観すると、広い殺虫スペクトルを有する有効成分から狭いものへと変化しているようである（表1）。例えば、登録有効成分の中で広い殺虫スペクトルのものは、2001年～2006年（6年間）、2007年～2011年（5年間）および2012年現在開発中で、それぞれ13剤中6剤、10剤中1剤、および8剤中1剤である。

表1. 日本における殺虫剤の有効成分の開発動向（2001～）

登録年	有効成分	会社	用途	殺虫スペクトルの 広さ
2001	インドキサカルブ	Dupont	虫	—
	チアクログ リド	Bayer	虫	広
	チアメトキサム	Syngenta	虫	広
	メトキシフェノジド	Dow	虫	—
	フルアクリピリム	日曹	ダニ	—
	クロチアニジン	住友	虫	広
2002	ジノテフラン	三井	虫	広
	トルフェンピラト	大塚	虫	広
2003	スピロジクロフェン	Bayer	ダニ	—
	ノバルロシ	SDS	虫	—
2004	ピリダリル	住友	虫	—
2006	エチプロール	Bayer	虫	広
	フロニカミド	石原	虫	—
2007	フルベンジアミド	日農	虫	—
	シフルメトフェン	大塚	ダニ	—
	スピロメシフェン	Bayer	ダニ	—
2008	シエノピラフェン	日産	ダニ	—
2009	メタフルミゾン	日農	虫	—
	クロラントラニリブ ロール	Dupont	虫	—
2010	イミダホス	カネショウ	センチュウ	—
	レピメクチン	三井	虫	広
	ピリフルキサゾン	日農	虫	—
2011	スピネトラム	住友	虫	広
開発中	スピロテトラマト	Bayer	虫	—
	NNI-0711	日農	ダニ	—
	シアントラニリブ ロール	Dupont	虫	広
	BCI-093	Bayer	虫	—
	スルフォキサフロール	Dow	虫	—
	フロメクチン	日化・明葉	虫	—
	ジプロベシ	明葉	虫	—
	フルエンシロホン	SDS	センチュウ	—

抵抗性マネジメント

殺虫剤抵抗性発達は、全世界（1908～2011年）で延9913事例（日本343事例）、延338化合物、延570害虫種が報告されている（IRAC、The Arthropod Pesticide Resistance Database）。そのトップテン害虫種（報告数）は、ナミハダニ（93）、コナガ（81）、モモアカアブラムシ（73）、コロラドハムシ（51）、イエバエ（50）、タバココナジラミ（45）、リンゴハダニ（45）、チャバネゴキブリ（43）、オウシマダニ（43）、オオタバコガ（43）であり、農業上重要害虫が7種もあげられる。抵抗性が発達した殺虫剤は延べ10,065事例あり、有機りん剤（32%）をトップに、ピレスロイド剤（31%）、有機塩素剤（15%）、カーバメート剤（7%）に次いで、ネオニコチノイド剤（3%）等の新しいグループでも計5.8%の事例が報告されている。

殺虫剤抵抗性発達を遅延・阻止するための抵抗性マネジメントは、古くからその構想が提唱され（Georghiou,1983）、抵抗性害虫の増加とともに研究は盛んである。しかし、農業生産現場への研究成果のフィードバック、即ち抵抗性発達遅延策の提案は「後手に回っている」ケースが多いのが現実である。だが、農薬の登録数減少が想定される現状では、後手に回らない抵抗性マネジメントに研究プライオリティを高め、防除に有効な殺虫剤をできるだけ延命させることが害虫防除現場から求められる重要な課題である。

そのために「殺虫剤抵抗性の諸性質」をできるだけ使用（販売）前あるいは直後までにあらかじめ解明し、抵抗性発達に関与する要因（促進要因、遅延要因）および感受性復元の可能性を知っておくことは現実的対応策を立案する上で有効である（山本、1998）。ここで抵抗性の諸性質とは、「抵抗性機構、遺伝様式、適応度、抵抗性の安定性、交差抵抗性、共力作用、等の性質」である。これまでの知見から、同じ殺虫剤であっても害虫種・系統で必ずしも抵抗性の諸特性が同じでは無いケースもあり、研究を実施あるいは抵抗性対策を立案する上で留意するポイントである。

抵抗性対策で現実的に実施されている方法は、①薬剤のローテーション散布、②既存剤の感受性低下と有効代替剤の事前認識を目的とした感受性

モニタリング、③農薬以外の防除手段による淘汰圧の削減（生物的、物理的、耕種類の防除）、④抵抗性マネジメント施策の現実的な実施が考えられる。

薬剤ローテーション散布の成功例に、岩手県のりんごの県防除暦での指導によるハダニ防除対策がある（鈴木,2010）。1980年代に有効な既存殺ダニ剤が登録失効する状況の中、当時の新剤ヘキシチアゾクス剤を「登録直後から」隔年使用することでハダニ防除とヘキシチアゾクス剤の延命に成功した。

また、感受性モニタリングの目的は、抵抗性の現状把握と有効剤の事前確認にある。その有益な事例として、静岡県（茶・ハマキムシ類用殺虫剤の事例）、長崎県・愛媛県・広島県・奈良県等の各県（殺ダニ剤の事例）の実施と生産現場への情報フィードバックがあげられる。

殺虫剤の交差抵抗性に関して、共通の作用点の変異あるいは解毒代謝活性上昇により主に同じタイプの薬剤に対して同時に抵抗性を示すものが多く報告されてきた。しかし現実的には、タイプが異なる複数の薬剤間でも交差抵抗性（いわゆる複合抵抗性）が認められている。この原因に関し、共通の解毒代謝活性上昇に加え、異なる抵抗性遺伝子の染色体上での連鎖関係も報告されている（Osakabeら、2009）。これらの殺虫剤間や殺ダニ剤間の交差抵抗性関係を生産現場で簡便・迅速に見極めることは現実的に困難であるため、従来の殺虫試験による地道なモニタリングの実施も望まれる。しかし、近年ではネギアザミウマのピレスロイド剤抵抗性を生化学的に診断できる方法も報告されており（三浦、2011）、その手法が現場で普及されることが期待される。

殺虫剤の淘汰圧の削減には、生物的・物理的・耕種の防除に期待するところも大きい。また、これらの防除法と化学的防除との両立は、後述する体系防除やIPMプログラムの構築にも求められている。その共存のためには、特に殺虫剤の生物的防除資材（天敵製剤と土着天敵）に対する影響（殺虫力、残毒期間）の許容度を明らかにし、その情報を共有する必要がある。実際に、日本バイオロジカルコントロール協議会と日植防の各ホームページでは情報提供がされている。

企業からの抵抗性マネジメントの喚起に関して

は、日本よりも海外でのIRACの活動が注目されている。例えば、新グループのジアミド系殺虫剤についてワーキンググループが結成され、ローテーション散布を基軸とした抵抗性対策が各国の主要作物で提案されている（IRAC ホームページ、2011）。

殺虫剤の生態影響リスク評価

殺虫剤抵抗性マネジメントの観点からは、淘汰圧削減に生物的防除との共存が先述のとおり重要である。しかし、殺虫剤は農業上問題となる昆虫類・ダニ類をターゲットとするため、有用昆虫類・天敵類に対する影響が懸念されるのは否めず、それがIPMプログラムの中で殺虫剤使用の位置付けが難しい一因である。

さらに、国内外の農薬登録規制でも生態影響リスク評価が要求されている。その目的は「対象となる化学物質（例えば殺虫剤）の生態系（個体群・群集）に対するリスクが許容できるか否かを科学的な証拠をもとに決定すること」にある。生態毒性試験は水生生物と陸生生物の多種の生物にわたって実施されるが、国や地域による環境・生態系の違いから要求される試験項目や基準は異なる。この生態影響リスク評価は、生態毒性試験結果および環境化学・物理化学的性状などの結果とともに総合的に相対評価される。

このような生態影響リスク評価は、実際の害虫体系防除プログラムや抵抗性マネジメントを構築する上でも考慮すべき点である。例えば、個々の殺虫剤に関して天敵類や有用昆虫類（受粉用ハチ類等）に対する影響を、特に圃場の実使用レベルで研究することは今後求められる役割である。最近、天敵資材のスワルスキーカブリダニと農薬の併用による害虫防除の考え方が研究事例を伴い報告された（宮田、2011）。これは殺虫剤の生態影響リスク評価に留まらず、殺虫剤抵抗性マネジメントにも貢献できる有用な提案ではないだろうか。

体系防除の必要性

個々の作物での体系防除の必要性は既に理解されており、それが各都道府県の防除基準や各地域JA作成の作物毎の防除暦という防除マニュアルで

生産者にフィードバックされている。しかし、あるメジャー作物を生産指導されている普及員から「抵抗性で効く薬が少なくなってきたので、この新系統の殺虫剤（の連用）に頼らざるを得ないのだが…」、あるマイナー作物の生産者から「登録のある農薬数が少ない！」との声をしばしば聞く。即ち、登録上の制限や抵抗性発達問題により、防除に使える「ツールの数」（農薬等）が現実的に少ないケースも存在している。

体系防除における殺虫剤の選択基準には主に次のポイントが考えられる。①「作物登録」：短い「収穫前日数」、および「周辺作物、作付前後作物」の登録有無。②「効果・薬害」：主対象害虫に対する効果および複数の害虫の同時防除。薬害への許容度。③「防除コスト」：10a当たりの散布液の薬価、栽培コストに見合った希釈倍数。④「異なる作用機構」を持つ複数の殺虫剤の選択。⑤「安全性（人畜、環境）」。⑥「有用生物への安全性」：受粉用ハチ類、天敵類（製品、土着）。⑦海外インポートトレランス。これらの選択基準で満足できるものが少ないケースでは、体系防除法を持続的に確立するのが困難となるだろう。この内、「作物登録」や「海外インポートトレランス」関係のポイントに関しては企業各社の協力も求められる。

今後求められる適切な体系防除の構築には、次のポイントを考慮することを提案したい。①個々の栽培産地が必要としている複数の殺虫剤とその選択基準。②生態影響リスク評価の情報。③後手に回らない抵抗性マネジメント。④コストパフォーマンス。⑤「減農薬」に捉われない選択的殺虫剤の有効活用。そして、各作物・地域で精査された体系防除がIPMプログラムと共存することを期待したい。それは、「持続的に登録のある殺虫剤をいかに上手に使用していくか」という普及的課題に対する切実な解決策と考えられ、取組む価値が高いであろう。

最後に、化学的防除の新たな役割

国内外の農薬関連行政の昨今の変遷（規制強化）により新農薬の開発と既存農薬の登録維持はさらに困難となる。そのため、今後の農薬の安全性はより高くなり環境に与える影響もより低くなるとい

うプラスの見込みがあるが、逆にその登録数は減少するというマイナスの予測もある。その状況の中では、これまでどおりの害虫防除を継続していかなければ、作物の持続的生産にも影響するであろうし抵抗性害虫の増加も招きかねない。

今後の時代に、持続的な害虫制御に向けて化学的防除が担う新たな役割として、使える殺虫剤を確保することを目的とした開発的役割として次の3点を提案したい（図4）。

開発的役割①

「安全性の高い新殺虫剤（有効成分）および剤型の開発」

開発的役割②

「既存剤のメンテナンス（再登録、適用拡大）」

開発的役割③ 「環境への暴露量の少ない製剤・施用法の開発」

また、殺虫剤を適切に永く使うことを目的とした普及的役割として次の3点を提案したい（図4）。

普及的役割①

「抵抗性マネジメントの喚起、研究および実施」

普及的役割②

「生態影響リスクに関する実用的な情報提供」

普及的役割③

「新しい体系防除プログラムの構築と実施」

このうち、開発的役割は栽培現場のニーズを把握しながら企業各社が主に担うものである。普及的役割はこれを担うのは企業各社だけではなく、国・都道府県およびJA等の流通関係も参画する必要があるだろう。

栽培現場では、昨今の無登録農薬の取締りとポジティブリスト制度の施行に伴い、農薬の適正使用が実施され社会的にも理解されている。今後の実防除でも、「より安全性の高い農薬の適切な使用による現場指向型の体系防除」が現実的になるだろう。既登録農薬の数は減少することが予測され、その剤構成も広い殺虫スペクトル剤だけでなく狭いスペクトルの殺虫剤の比率も増えるだろう。また安全性に関する規制をクリアした農薬（殺虫剤）が今後は登録されるため、「減農薬」に捉われずに体系防除が実践できる時代が近づいている。そして、時代の要請に応じた化学的防除の新たな役割を実践し、防除効果の確実性が高く持続的な食料生産

に貢献できる化学的防除（特に殺虫剤の使用）が、環境負荷低減を目的とした IPM プログラムの中にこれまで以上に深く位置付けされることを期待したい。

また、農業生産者、特に大規模経営を目指しておられる生産者の皆様には、農業経営の成功と安定を目指すために適切な病虫害防除を実践していただきたいと考える。そのために、化学的防除（農薬）をよく知り、農薬使用のエキスパートとして自信を持って適正で効率的に使用して欲しい。そして農産物の生産効率を上げ、消費者の皆さんを喜ばせて欲しいと願う。冒頭で述べたビジョン「持続的に農業生産者に儲けていただき消費者は美味しく食

べようという Win-Win の総合戦略」にはリーダーが存在し得ない。したがって、このビジョンを実現するためには、化学的防除に関わる総ての関係機関・個人が相互に信頼・連携し、農業生産者に貢献・支援する姿勢が最も大切な役割と考えている。

（本稿は、平成 23 年 6 月 9 日開催の第 16 回農林害虫防除研究会山口大会におけるシンポジウム講演の内容を基に作成した。）

引用文献の記載は、紙面の都合上割愛させていただいた。

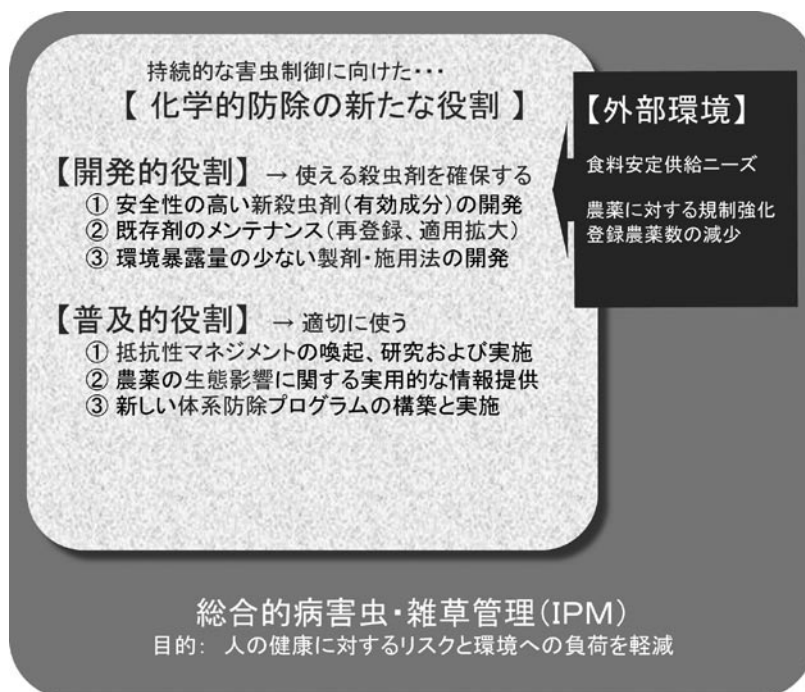


図4.持続的な害虫制御に向けた化学的防除の新たな役割