

Ⅲ 薬剤抵抗性管理

同一作用機構の農薬を連用・多用することで、農薬の効果が低下し、防除効果が落ちる「薬剤抵抗性の発達」が懸念されている。これを防ぐため、作用機構の異なる薬剤によるローテーション防除と、化学合成農薬だけに依存しない総合的病害虫・雑草管理（IPM）への取り組みが必要である。

注）雑草の薬剤抵抗性については、水田雑草で問題となっているスルホニルウレア系除草剤抵抗性雑草対策を、本防除基準の除草剤（水稲）の項目に掲載している。

1 薬剤抵抗性と交差抵抗性

(1) 殺菌剤耐性

もともと耐性菌は圃場に 10^{-6} から 10^{-9} くらいの割合で存在する。薬剤によって感受性菌が淘汰され、耐性菌と入れ替わる。潜伏期間（植物への感染から発病までの期間）が短くて作付期間中に何度も世代交代を繰り返す各種うどんこ病や灰色かび病菌などは、耐性が発達しやすい。

(2) 殺虫剤抵抗性

農薬が処理される前の害虫集団の中には、特定の殺虫剤に抵抗性に関わる遺伝子を持った個体がわずかに混在している。そのような集団に同じ殺虫剤を繰り返し使用すると遺伝的な耐性を持つ個体だけが生き残り繁殖する。一世代の期間が短く、一年間に発生する世代数が多いハダニ類やアブラムシ類、アザミウマ類、コナガ等は抵抗性が発達しやすい。

(3) 交差抵抗性

ある薬剤に対して抵抗性が発達した病害虫は、作用機構が類似した別の薬剤に対し抵抗性を示すことがある。

2 FRAC 及び IRAC による分類

- (1) 本防除基準では、殺虫剤及び殺菌剤について系統の区別を明確にし、ローテーション防除の参考とするため、FRAC（Fungicide Resistance Action Committee：殺菌剤耐性菌対策委員会）及びIRAC（Insecticide Resistance Action Committee：殺虫剤抵抗性対策委員会）の農薬有効成分の作用機構分類表に従って、分類番号（コード）を掲載した。
- (2) この分類は、これまで「系統」として示していた分類を、対象とする病害虫への作用機構の違いにより、改めて分類した内容となっている。
- (3) 本防除基準に掲載する殺虫剤及び殺菌剤作用機構分類は、農薬工業会が翻訳したもの（改正2022年）のうち、本防除基準に掲載している農薬成分について整理し、一部加筆修正したものである。なお、分類のない有効成分のうち、作用機構が明らかなものは、コードの右肩に * をつけて掲載している。（例：「M1*」等）

引用：農薬工業会ホームページ 農薬情報局 農薬の作用機構分類
<https://www.jcpa.or.jp/labo/mechanism.html>

3 薬剤抵抗性管理の考え方

薬剤抵抗性が発達すると、それまで使用していた農薬の効果が著しく低下して使用できなくなり防除が困難となる。

このため、農薬散布にあたってはFRAC及びIRACの作用機構分類に基づき、作用機構の異なる薬剤をローテーション散布することにより、薬剤抵抗性の発達を抑制する必要がある。

また、農薬を使用する限りローテーション散布を行っても完全に薬剤抵抗性を防ぐことは難しい。農薬以外の防除法を取り入れた、総合的病害虫・雑草防除管理（IPM）への取り組みが必要である。

(1) 作用機構の異なる薬剤によるローテーション散布

化学合成農薬を使用する場合は、それぞれの発生世代毎に同一の作用機構を持つ農薬を使用しないことを基本とし、本防除基準に掲載されている内容を参考に、作用機構の異なる薬剤を組み合わせることで、薬剤抵抗性の発達を抑えていく。

また、薬剤耐性菌が確認されている一部の薬剤については、ガイドライン（下記）が公開されているので参考にする。

産地における防除暦等を作成する場合も、このことに十分配慮した薬剤の選定を行う。

参考：日本植物病理学会 殺菌剤耐性菌研究会によるガイドライン

<http://www.taiseikin.jp/guidelines/>

「イネいもち病防除における QoI 剤及び MBI-D 剤耐性菌対策ガイドライン」

「野菜・果樹・茶における QoI 剤及び SDHI 剤使用ガイドライン」

「耐性菌対策のための CAA 系薬剤使用ガイドライン」

「DMI 剤ガイドライン」

(2) IPMの実践

総合的病害虫・雑草管理（IPM: Integrated Pest Management）とは、病害虫の発生状況に応じて、物理的防除（防虫ネット、黄色LED）や生物的防除（生物農薬、交信かく乱剤）等の防除方法を適切に組み合わせ、環境への負荷を軽減しつつ、病害虫の発生を抑制する防除体系のことをいう。

「予防的措置」「判断」「防除」を適切に行い、化学合成農薬だけに頼らない栽培管理を行う。

1) 耕種的防除法

抵抗性（耐病性）品種／台木の導入、残渣処理、雑草防除、緑肥作物、輪作 等

2) 物理的防除法

防虫ネット、黄色光、粘着トラップ、光反射マルチ、紫外線除去フィルム、気門封鎖剤、UV-Bランプ 等

3) 生物的防除法

生物農薬（天敵農薬、微生物農薬）、BT剤、性フェロモン剤、交信かく乱剤 等

(3) I PMの基本的な実践方法

1) 第1段階「予防的措置」

病害虫・雑草の防除では、発生する前に予防することが重要であることから、耕種的防除（作型の検討、排水対策、抵抗性品種の導入、伝染源の除去等）をできるだけ徹底して行う。

また、発生が見込まれる病害虫・雑草は、予防防除に努める。

2) 第2段階「判断」

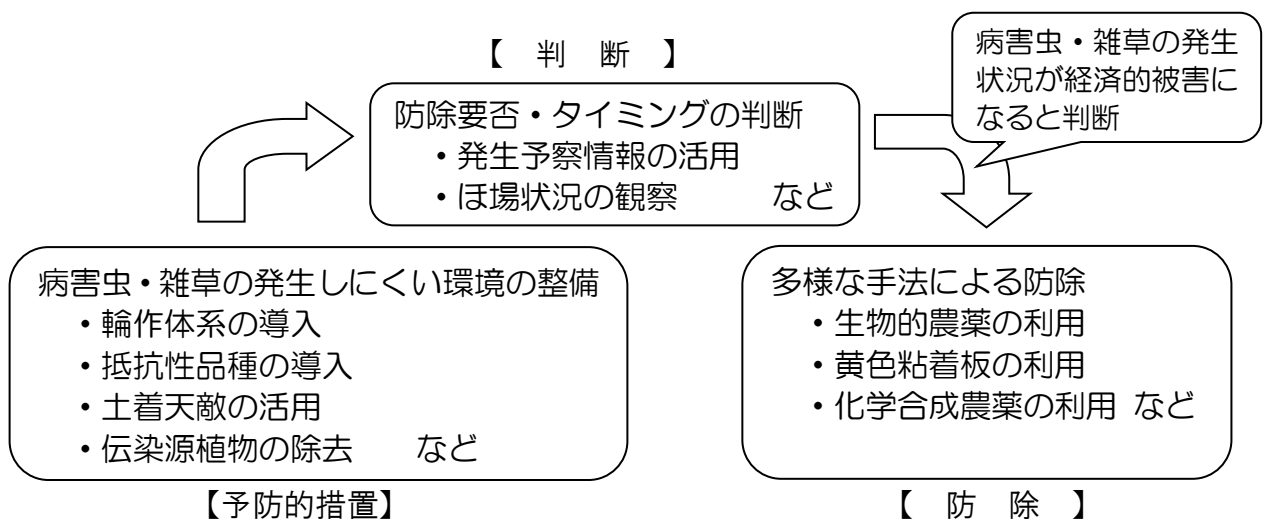
日ごろから、ほ場の状況を入念に観察し、虫めがね等を利用して、発生している病害虫の種類や密度を把握し、防除適期を判断する。

また、病害虫防除所等の発表する発生予察情報入手し、判断の参考とする。

3) 第3段階「防除」

防除が必要であると判断した場合には、コスト、労力及び防除効果を考えて、物理的防除、生物的防除、化学的防除から最適な防除方法を選択する。

また、化学農薬を使用する場合は、飛散しにくい剤型及び選択性の高い農薬の使用を心掛け、飛散しにくい方法で散布する。



(4) I PM実践指標の活用

本県では、I PMをどの程度実践できているかを作物毎に判断する資料として、I PM実践指標を作成している。

この指標を基に、既に実践していることは何か、不足していることが何か、改善できることがあるかを確認・評価することができる。

参考：長野県ホームページ「長野県 I PM実践指標について」

<https://www.pref.nagano.lg.jp/nogi/sangyo/nogyo/kankyo/ipm.html>

■殺菌剤の作用機構分類 (農薬工業会 FRAC 作用機構分類一覧表 2022年6月版より作成)

作用機構	標的部位とコード	グループ名	化学グループ	FRAC コード
A 核酸合成 代謝	A1:RNAポリメラーゼ I	PA 殺菌剤(フェニルアミド類)	アシルアラニン類	4
	A3:DNA/RNA 生合成 (提案中)	芳香族ヘテロ環類	イソキサゾール類	3 2
	A4:DNA トポイソメラーゼ タイプ II (ジャイレース)	カルボン酸類	カルボン酸類	3 1
	A5:デノボピリミジン生合成 におけるジヒドロオロト 酸デヒドロゲナーゼ阻害	DHODHI 殺菌剤	フェニルプロパノール	5 2
B 細胞骨格と モータータン パク質	B1:β-チューブリン重合 阻害	MBC 殺菌剤(メチルベンゾ イミダゾールカーバメート)	ベンゾイミダゾール類 チオファネート類	1
	B2:β-チューブリン重合 阻害	N-フェニルカーバメート類	N-フェニルカーバメート類	1 0
	B3:β-チューブリン重合 阻害	チアゾールカルボキサミド類	エチルアミノチアゾールカル ボキサミド	2 2
	B4:細胞分裂(作用点不 明)	フェニルウレア類	フェニルウレア類	2 0
	B5:スペクトリン様タンパク 質の非局在化	ベンズアミド類	ピリジニルメチルベンズアミド類	4 3
	B6:アクチン/ミオシン/ フィンプリン機能	アリルフェニルケトン類	ベンゾイルピリジン	5 0
C 呼吸	C1:複合体 I :NADH 酸 化還元酵素	ピリミジンアミン類	ピリミジンアミン類	3 9
		ピラゾールカルボキサミド類	ピラゾールカルボキサミド類	
	C2:複合体 II :コハク酸脱 水素酵素	SDHI(コハク酸脱水素酵素 阻害剤)	フェニルベンズアミド類	7
			ピリジニルエチルベンズアミド類	
			チアゾールカルボキサミド類	
			ピラゾール-4-カルボキサミド類	
			ピリジニルカルボキサミド類	
	C3:複合体 III :チトクローム bc1 (ユビキノール酸化 酵素) Qo 部位 (cyt b 遺伝 子)	QoI 殺菌剤 (Qo 阻害剤)	メキシアクリレート類	1 1
			メキシアセトアミド類	
			メキシカーバメート類	
オキシイミノ酢酸類				
オキシイミノアセトアミド類				
オキサゾリジンジオン類				
ジヒドロジオキサジン類				
イミダゾリノン類				
ベンジルカーバメート類				
C4:複合体 III :ユビキノ 還元酵素 Qi 部位	QiI 殺菌剤 (Qi 阻害剤)	シアノイミダゾール	2 1	
		スルファモイルトリアゾール		
C5:酸化的リン酸化の脱 共役			2,6-ジニトロアニリン類	2 9
C8:複合体 III :ユビキノ 還元酵素 (Qo 部位、スチグマテリン 結合サブサイト)	QoSI 殺菌剤(Qo 阻害剤、 スチグマテリン結合タイプ)		トリアゾロピリミジリアミン	4 5

作用機構	標的部位とコード	グループ名	化学グループ	FRAC コード
D アミノ酸およびタンパク質 合成	D1:メチオニン生合成 (<i>cgs</i> 遺伝子) (提案中)	AP 殺菌剤(アニリノピリミジン類)	アニリノピリミジン類	9
	D3:タンパク質生合成 (リボソーム翻訳開始段階)	ヘキソピラノシル抗生物質	ヘキソピラノシル抗生物質	2 4
	D4:タンパク質生合成 (リボソーム翻訳開始段階)	グルコピラノシル抗生物質	グルコピラノシル抗生物質	2 5
	D5:タンパク質生合成 (リボソームポリペプチド 伸長段階)	テトラサイクリン抗生物質	テトラサイクリン抗生物質	4 1
E シグナル 伝達	E2:浸透圧シグナル伝達 における MAP/ヒスチジン キナーゼ(<i>os-2</i> , <i>HOG1</i>)	PP 殺菌剤(フェニルピロール類)	フェニルピロール類	1 2
	E3:浸透圧シグナル伝達 における MAP/ヒスチジン キナーゼ(<i>os-1</i> , <i>Daf1</i>)	ジカルボキシイミド類	ジカルボキシイミド類	2
F 脂質生合成 または輸送 ／細胞膜の 構造または 機能	F2:リン脂質生合成、メ チルトランスフェラーゼ	ホスホロチオレート類 ジチオラン類	ホスホロチオレート類 ジチオラン類	6
	F3:細胞脂質の過酸化 (提案中)	AH 殺菌剤(芳香族炭化水素) (クロロフェニル類、ニトロア ニリン類)	芳香族炭化水素	1 4
	F4:細胞膜透過性、脂肪 酸 (提案中)	カーバメート類	カーバメート類	2 8
	F9:脂質恒常性および 輸送／貯蔵	OSBPI オキシステロール結合タン パク質阻害	ピペリジニルチアゾールイ ソオキサゾリン類	4 9
G 細胞膜の ステロール 生合成	G1:ステロール生合成の C14 位の脱メチル化酵 素(<i>erg11/cyp51</i>)	DMI 殺菌剤(脱メチル化阻 害剤) (SBI:クラス I)	ピペラジン類 ピリミジン類 イミダゾール類 トリアゾール類	3
	G3:ステロール生合成系 の C4 位脱メチル化にお ける 3-ケト還元酵素 (<i>erg27</i>)	KRI-殺菌剤(ケト還元酵素 阻害剤) (SBI:クラス III)	ヒドロキシアニド類 アミノピラゾリン	1 7
H 細胞壁 生合成	H4:キチン合成酵素	ポリオキシン類	ペプチジルピリミジンヌクレ オシド	1 9
	H5:セルロース合成酵素	CAA 殺菌剤 (カルボン酸アミド類)	桂皮酸アミド類	4 0
			バリンアミドカーバメート類 マンデル酸アミド類	

作用機構	標的部位とコード	グループ名	化学グループ	FRAC コード
I 細胞壁の メラニン合成	I1:メラニン生合成の還元酵素	MBI-R (メラニン生合成阻害剤-還元酵素)	イソベンゾフラン	16.1
			ピロロキノリン	
	トリアゾロベンゾチアゾール			
I2:メラニン生合成の脱水酵素	MBI-D (メラニン生合成阻害剤-脱水酵素)	シクロプロパンカルボキサミド	カルボキサミド	16.2
			プロピオンアミド	
I3:メラニン生合成のポリケタイド合成酵素	MBI-P (メラニン生合成阻害剤-ポリケタイド合成酵素)	トリフルオロエチルカーバメート	16.3	
P 宿主植物の 抵抗性誘導	P2:サリチル酸シグナル伝達	ベンゾイソチアゾール	ベンゾイソチアゾール	P 2
	P3:サリチル酸シグナル伝達	チアジアゾールカルボキサミド	チアジアゾールカルボキサミド	P 3
	P7:ホスホナート	ホスホナート類	エチルホスホナート類	P 7
	P8:サリチル酸シグナル伝達	イソチアゾール	イソチアゾリルメチルエーテル	P 8
U 作用機構不明(リスト中、U番号のないものは再分類された殺菌剤)	不明	シアノアセトアミドオキシム	シアノアセトアミドオキシム	2 7
	不明	ベンゼンスルホンアミド類	ベンゼンスルホンアミド類	3 6
	不明	フェニルアセトアミド	フェニルアセトアミド	U 6
	不明	チアゾリジン	シアノメチレンチアゾリジン	U 1 3
	不明	ピリミジノンヒドラゾン類	ピリミジノンヒドラゾン類	U 1 4
	複合体Ⅲ:チトクロームbc1、結合部位不明(提案中)	4-キノリル酢酸	4-キノリル酢酸	U 1 6
	不明	テトラゾリルオキシム	テトラゾリルオキシム	U 1 7
	不明(トレハラーゼ阻害)	グルコピラノシル抗生物質	グルコピラノシル抗生物質	U 1 8
NC 未分類	不明	種々	種々	N C
M 多作用点接触活性	多作用点接触活性	無機化合物(求電子剤)	銅(種々の塩)	M 1
		無機化合物(求電子剤)	硫黄	M 2
		ジチオカーバメート類及び類縁体(求電子剤)	ジチオカーバメート類及び類縁体	M 3
		フタルイミド類(求電子剤)	フタルイミド類	M 4
		クロロニトリル類(フタロニトリル類)(作用点不明)	クロロニトリル類(フタロニトリル類)	M 5
		ビスグアニジン類(細胞膜攪乱剤、界面活性剤)	ビスグアニジン類	M 7
		キノン類(アントラキノン類)(求電子剤)	キノン類(アントラキノン類)	M 9
		キノキサリン類(求電子剤)	キノキサリン類	M 1 0
		マレイミド(求電子剤)	マレイミド	M 1 1
BM 複数の作用機構を有する生物農薬:微生物農薬	複数の作用が報告されている:競合、菌寄生、抗菌作用、殺菌性リポペプチドによる細胞膜破壊、溶菌酵素、抵抗性誘導	微生物(生存微生物、またはその抽出物、代謝物)	(細菌 バチルス属)	BM 2

注) FRAC コード: 交差耐性の特性に従って殺菌剤グループを数字と文字で分類している。数字は原則当該殺菌剤が上市された順に割振っている。文字は“P=作物の抵抗性誘導”、“M=多作用点阻害剤”、“U=作用機構不明(または未確定)”、“BM=複数の作用機構を有する生物農薬/生物由来の農薬”を示す。“U-”とされた殺菌剤で新たな研究に基づき再分類された場合、その“U-”コードは削除され、再利用されない。

■ 殺虫剤の作用機構分類

(IRAC International 作用機構作業部会 IRAC 作用機構分類体系 2022 年 6 月発行 第 10.3 版より作成)

1 次作用部位	主要グループ	サブグループ あるいは代表的有効成分	IRAC コード
神経作用	アセチルコリンエステラーゼ (AChE) 阻害剤	1A:カーバメート系	1
		1B:有機リン系	
神経作用	GABA 作動性塩化物イオンチャンネルブロッカー	2B:フェニルピラゾール系 (フィプロール系)	2
神経作用	ナトリウムチャンネルモジュレーター	3A:ピレスロイド系、ピレトリン系	3
神経作用	ニコチン性アセチルコリン受容体(nAChR) 競合的モジュレーター	4A:ネオニコチノイド系	4
		4C:スルホキシミン系	
		4E:メソイオン系	
		4F:ピリジリデン系	
神経作用	ニコチン性アセチルコリン受容体(nAChR) アロステリックモジュレーター・部位 I	スピノシン系	5
神経および筋肉作用	グルタミン酸作動性塩化物イオンチャンネル (GluCl)アロステリックモジュレーター	アベルメクチン系、ミルベマイシン系	6
生育調節	幼若ホルモン類似剤	7C:ピリプロキシフェン	7
	その他の非特異的(マルチサイト)阻害剤	8B:クロロピクリン 8F:メチルイソチオシアネートジェネレーター	8
神経作用	弦音器官 TRPV チャンネルモジュレーター	9B:ピリジン アブメチン誘導体	9
生育調節	CHS1 に作用するダニ類成長阻害剤	10A:クロフェンテジン、ヘキシチアゾクス	10
		10B:エトキサゾール	
	微生物由来昆虫中腸内膜破壊剤	11A: <i>Bacillus thuringiensis</i> と生産殺虫 タンパク質	11
エネルギー代謝	ミトコンドリア ATP 合成酵素阻害剤	12C:プロパルギット	12
エネルギー代謝	プロトン勾配を攪乱する酸化的リン酸化脱共役剤	ピロール系	13
神経作用	ニコチン性アセチルコリン受容体(nAChR) チャンネルブロッカー	ネライストキシン類縁体	14
生育調節	CHS1 に作用するキチン生合成阻害剤	ベンゾイル尿素系	15
生育調節	キチン生合成阻害剤、タイプ1	ブプロフェジン	16
生育調節	脱皮ホルモン(エクダイソン)受容体アゴニスト	ジアシル-ヒドラジン系	18
神経作用	オクトパミン受容体アゴニスト	アミトラズ	19
エネルギー代謝	ミトコンドリア電子伝達系複合体III阻害剤	20B:アセキノシル	20
		20D:ビフェナゼート	
エネルギー代謝	ミトコンドリア電子伝達系複合体I 阻害剤 (METI)	21A:METI 剤	21
神経作用	電位依存性ナトリウムチャンネルブロッカー	22A:オキサジアジン系	22
		22B:セミカルバゾン系	
脂質合成、生育調節	アセチル CoA カルボキシラーゼ阻害剤	テトロン酸およびテトラミン酸誘導体	23
エネルギー代謝	ミトコンドリア電子伝達系複合体IV阻害剤	24A:ホスフィン系	24
エネルギー代謝	ミトコンドリア電子伝達系複合体II 阻害剤	25A:β-ケトニトリル誘導体	25
		25B:カルボキサニリド系	
神経および筋肉作用	リアノジン受容体モジュレーター	ジアミド系	28
神経作用	弦音器官モジュレーター 標的部位未特定	フロニカミド	29
神経作用	GABA 作動性塩化物イオンチャンネルアロステ リックモジュレーター	イソオキサゾリン系	30
神経作用	カルシウム活性化カリウムチャンネル(KCa2)モ ジュレーター	アシノナピル	33
エネルギー代謝	ミトコンドリア電子伝達系複合体III阻害剤-Qi サイト	フロメキン	34
	作用機構が不明あるいは不明確な剤	キノメチオナート	UN
		石灰硫黄合剤	
		ピリダリル	
		硫黄	

注) 作用機構が不明または検討中、あるいは、毒性発現機構が不明な化合物は、適切な作用機構に分類できる根拠が得られるまで“UN”の欄に掲載される。