

気候変動が農薬の挙動と効果に及ぼす影響

農業環境技術研究所 奥 語 靖 洋

はじめに

地球が誕生してから現在に至るまで、温暖化と寒冷化が何度も繰り返される中で、様々な気候変動が異なる規模で起こってきた。しかし、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第4次評価報告書において、20世紀後半から見られる大気の急激な温度上昇の主因は人為的なものとしている。

地球には様々な気候帯が存在し、偏西風・貿易風・季節風等の形で大気が大きく流れている。近年、エルニーニョやラニーニャに代表されるように、それら気候帯や大気の流れに変化が起こり、豪雨、砂漠化、高温・低温、気象災害等の異常気象が発生している。また、我が国でも温暖化が進行することにより、東日本では北方針葉樹林帯が減少し、西日本では亜熱帯林が増加するといわれている。

農薬も人為的活動の一つであり、環境にプラスまたはマイナスの影響を与える一方で、このような環境の変化も農薬に影響を与える。農薬は主に病害虫・雑草防除を目的とした農業資材であり、有機・無機の化学物質や生物など様々な種類がある。

ここでは低分子有機化学物質である化学合成農薬 (以後「農薬」とする) について、温度を中心に、気候変動が農薬の挙動や効果に及ぼす影響について述べる。

I 農薬の環境中挙動に及ぼす気候変動の影響

農薬の環境中挙動は極めて複雑であり、処理後、様々な媒体を介在して、代謝や分解を受けながら環境中を移動する (図-1)。農薬の曝露には直接的なものと間接的なものがある。直接的なものには、目的とする農耕地に散布される以外に、薬液タンクに薬液が残ったまま他の農耕地に散布したり、スプレードリフト (散布時の直接的なもの) によって農耕地周辺の地域が農薬に汚染されたりする。間接的なものについては、いったん土壤に落下したものが、そこに残留して後作物が吸収したり、表面流出や地下浸透によって表層水 (河川や湖沼) や地下水を汚染したりする。さらにその水を利用することで、

他の作物や環境が農薬に曝露される。また、土壤や作物に残留した農薬のベーパードリフト (処理された場所から拡散する間接的なもの) によって、周辺環境が汚染される。非常にまれな事例ではあるが、海外で使われていた農薬が飼料作物に残留し、それを餌として食べた我が国の家畜から出た糞尿を堆肥として利用したところ、その農耕地に栽培した作物に残留したこともある。

さらに、農薬の挙動は、気候変動によって、関連する物質とともに大きく変化する (図-2)。例えば、農耕地や陸水・海洋では、農薬は温度が上がると揮発や生分解が高まる。降雨が多いと表面流出が増加し、少なれば分解しにくくなるとともに残留しやすくなる。山林では、温度が上がると雪解けによって農薬が揮発し、水系に流入する。大気中では、温度の上昇とともに光分解だけでなく、複雑な仕組みによって農薬の分解にも関与するオゾン (O₃) が増減し、降雨が多いと農薬の沈着が増える (NOYES et al., 2009)。

このように、農薬は媒体内や媒体間、または後述するように媒体とともに移動するため、媒体が受ける気候変動の影響を直接または間接的に受ける。また、ここで取り上げる化学合成農薬に限定しても、物理化学的性質に大きな違いが見られ、その用途や場面も多様なので、環境中および生物体内の挙動も様々と想定できる。

1 土壤

農薬は、土壤中において、一般に、蒸散・蒸発、流亡、浸透、拡散、光・化学的分解等の物理化学的要因や、微生物等の生物的要因によって減衰する (金沢, 1992)。例えば、北極から熱帯地域まで幅広い気候における温度を想定した土壤モデル系を用いて7種類の農薬の消失を調べたところ、大部分の農薬で消失速度定数の対数が温度に対して直線的に上昇し、密閉系に比べて開放系、滅菌条件に比べて非滅菌条件で消失が速いことが示されたものの、消失に対する蒸散や生分解の寄与は、農薬や土壤の種類によって大きな違いが見られた (川勝ら, 2009)。

一方、農薬は時間とともに土壤に強く吸着する、いわゆる「エージング (aging)」が起こり、生物学的利用能 (Bioavailability) が低下することも知られている。なかでも、残留性有機汚染物質 (POPs: Persistent Organic Pollutants) に指定された化学物質は、土壤に強く吸着

Impact of Climate Change on Pesticide Behavior and Activity.
By Yasuhiro Yogo

(キーワード: 農薬, 気候変動, 温度, 挙動, 効果)

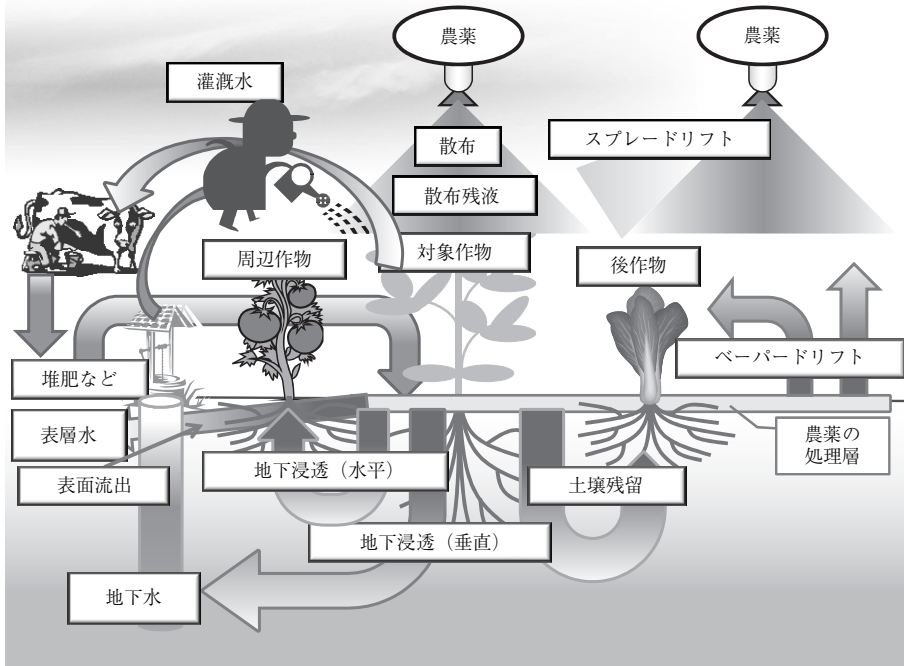


図-1 農薬の環境中挙動

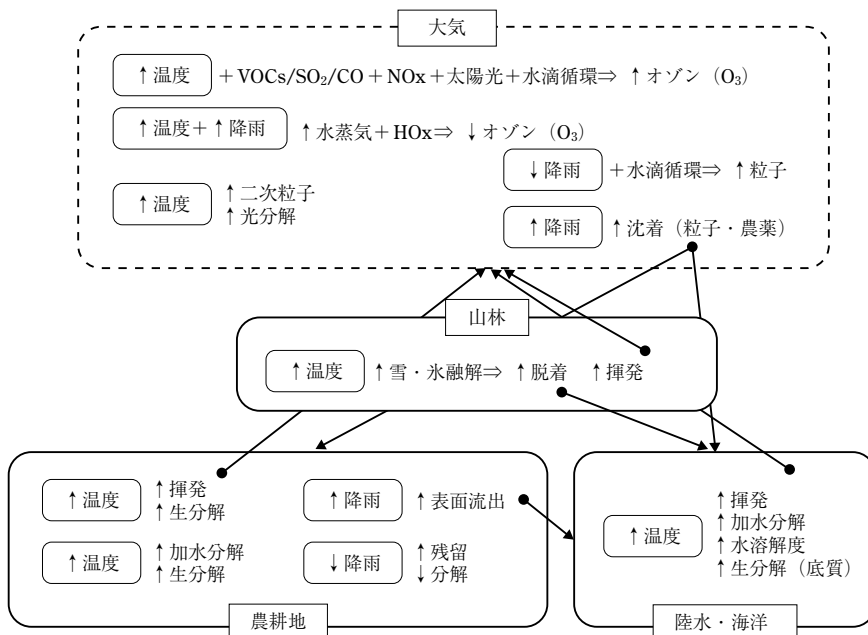


図-2 気候変動が農薬の環境中挙動に及ぼす影響 (Noves et al., 2009 から改変)

し、結果として土壤中に長期間残留する。ちなみに2009年5月に開催されたPOPs条約の第4回締約国会議(COP4)において、POPs指定化学物質は8物質

($\alpha/\beta/\gamma$ -HCHを一つとする)追加され、農薬が主たる用途のものは3物質増えて10物質となった。土壤侵食に伴う農薬の移動も考慮する必要がある。米

国では、耕地面積全体で年間約10億tを超える土壌侵食が生じている。例えば、カンザス州において、1995～96年の冬にかけて、風食と水食によって約50mm (650 t/ha) の土壌が流亡した。このような土壌侵食の面積は、アジアやアフリカ地域で高く、我が国も例外ではない。北海道では、風食によって、土壌表層に形成された農薬の処理層が消失し、病害虫・雑草防除の効果が低下するなどの農業被害が生じている。また、同地域において、融雪後、表層土壌が軟化しているとき、降雨によって水食を受けることもある。一方、沖縄や極端な傾斜地の農耕地では、豪雨によって土壌が流亡し、病害虫・雑草防除効果の低下だけでなく、土壌が河川や沿岸域まで流れ込むことによる環境影響も深刻である。

農薬は、一般に土壌に吸着しやすい性質をもっているため、土壌に吸着した農薬はこれらの土壌侵食とともに移動し、周辺環境を汚染し、底質や生物相等に残留する。

2 水

農薬の土壌中移動は主に水を介する、つまり土壌から脱着して土壌溶液中に溶解した農薬が水とともに移動するのである。土壌中と同様、農薬は水中でも物理化学的または生物的要因で減衰する。アセタミプリドは、溶液中で光によって分解するが、温度の上昇とともにその分解性が高まる (GUOHONG et al., 2009)。また、農薬の水中における加水分解速度は、絶対温度を説明変数に含む Arrhenius の式 (式1) で求めた値によく当てはまるのが数多くの文献で報告されている。ピレスロイド系殺虫剤サイバメスリンは、pH 3～11の範囲でいずれも温度の上昇とともに分解速度が上昇した (TAKAHASHI, N. et al., 1985)。

$$k = A \cdot \exp(-E/RT) \quad (\text{式1})$$

A: 温度に無関係な定数, E: 活性化エネルギー, R: 気体定数, T: 絶対温度

次に、水は温度の上昇とともに水蒸気から気体へ、下降とともに液体から固体 (氷) へと形態が変化する。物質が気体と液体の間で平衡状態のとき、Clausius - Clapeyron の式 (式2) が成立し、液体と固体が共存する場合は、下式の v_g と v_l をそれぞれ v_l と v_s (固体のモル体積) に置き換えることができる。式2にも説明変数に絶対温度が含まれており、農薬の媒体間の分配も、絶対温度の影響を受けることがわかる。

$$dP/dT = L/T(v_g - v_l) \quad (\text{式2})$$

P: 圧力, T: 絶対温度, v_g , v_l : 気体, 液体のモル体積, L: モル蒸発熱

さらに、農薬の水田からの系外流出予測モデルの一つである PADDY (稲生, 2004) においては、分解速度に前述の Arrhenius の式、土壌吸着に浸透圧に関する Van't Hoff の式、水面からの揮発に Dilling の式が利用されており、いずれも説明変数に温度が含まれている。しかし、農薬の土壌吸着性に対する温度の影響に関する数多くの研究を見ると、両者間において正または負の相関や影響を受けないなどの様々な現象が報告されている。その理由として、土壌や農薬の種類の違いやその他の変動要因が想定できるものの、それらの関係解明にあたっては、今後さらなる体系的な取り組みが必要である。

3 大気

農薬の大気中挙動に及ぼす気候変動の影響については、土壌や水からの拡散、マルチフィルムの透過性、大気中分解や移動など様々な観点がある。以下にその一部について概略を述べる。

(1) 土壌からの拡散

農薬が大気中を拡散する形態には、ガス状 (農薬そのものが気化した状態) と粒子状 (農薬が水滴や微小粒子に吸着した状態) の両方がある。風洞を利用したアクティブサンプリングシステムによって、畑地土壌に処理した除草剤について、粒子状で拡散するものを石英フィルターで、ガス状で拡散するものを PUF (ポリウレタンフォーム) で捕集した (図-3) ところ、ガス状と粒子状の農薬の割合は、薬剤間で大きな違いがあった。その順位は季節変動の影響を受けないものの、ガス状の農薬は夏期のほうが冬期よりも多いのに対して、粒子状の農薬は逆の傾向を示した (興語・小原, 2005; 興語, 2006)。

(2) マルチフィルムの透過性

2012年に全廃が決まっている臭化メチルを含む土壌くん蒸剤は、効果の持続や安定のために、通常ポリエチレンやポリ塩化ビニルのフィルムを用いて被覆する。しかし、それらフィルムの薬剤透過性は高く、薬剤は被覆期間中も比較的速やかに大気へ放出され、その温度依存性も高い。フィルムの透過性が高まれば、効果の低下だけでなく、透過して大気中に拡散した薬剤によってオゾン層破壊や作業者の健康にも影響する。それらを防ぐために、小原らはフィルムにいくつか改良を試みた (小原, 2003; 2005)。高密度ポリエチレン繊維製不織シートは、拡散反射により太陽光をほぼ100%反射することでフィルム温度の上昇を抑制し、薬剤透過性を低減した。ガスバリア性に優れたポリアミドフィルムは、薬剤の大気放出量を大幅に低減した。アナターゼ型酸化チタンや酸化亜鉛等の光触媒は、それらをフィルムに組

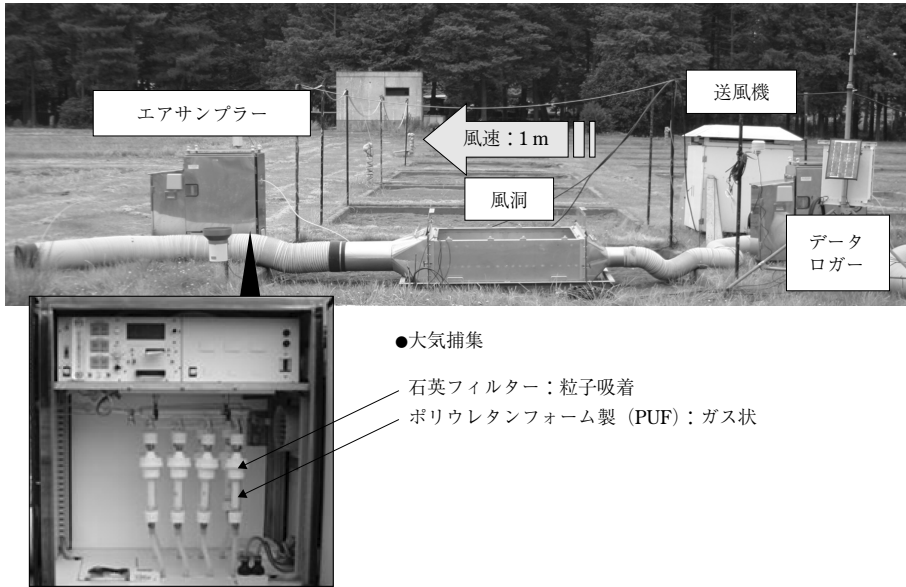


図-3 土壌からベーパードリフトした農薬を捕集するためのシステム

入れることで、薬剤の分解を促進した。また、これらを組合せればさらに効果的と考えられる。

(3) 大気中分解

気体状態で存在する農薬の分解と土壌や植物等物質表面における分解は、マイクロレベルで考えれば完全には分離できない。それは土壌の団粒構造による空隙や植物の葉の構造から容易に推察できる。これまでの研究から、大気中での OH ラジカル反応である光化学的酸化分解については、温度が影響すると考えられている (KATAGI, 2004)。

4 マルチメディアモデル

地域レベルから全球規模の農薬の挙動の推定には、多媒体 (マルチメディア) を想定したフガシティー (逃散能, 逸散度) モデルが利用される。このモデルは圧力ベースであり、濃度ベースの分配モデルとは異なる。例えば濃度では水から大気に移動する場合も、フガシティーでは大気から水に移動する (図-4)。フガシティーを用いる理由は、濃度ベースのモデルの場合、媒体が多くなると、それらの組合せ分だけ分配係数を求める必要があるが、フガシティーならば一つで済むためである。このモデルは生物濃縮性の推定にも利用できることが近年報告されている。

$$f = C/Z \quad (\text{式 3})$$

f : フガシティー (Pa), C : 各媒体における濃度, Z : フガシティー・キャパシティー ($\text{mol/m}^3 \cdot \text{Pa}$)

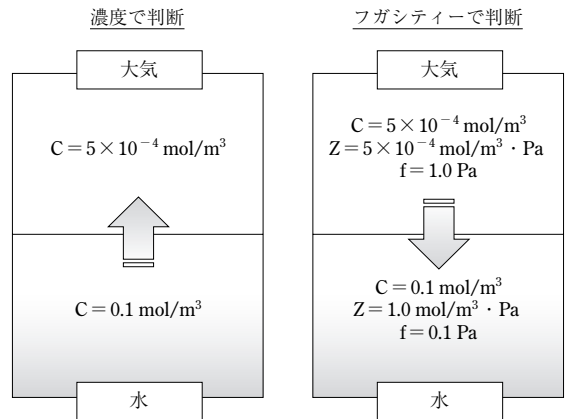


図-4 フガシティーの考え方

等温等圧過程の自由エネルギーであるギブス自由エネルギー (ΔG^0) は、理想系においては式 4 で求める。一方、実存系の場合は分子間力を想定する必要があるものの、そこでもフガシティーで補正していること以外は、変動要因は基本的に理想系と変わらないことから、ここでも温度の影響を受ける。

$$\Delta G^0 = \mu^0 + RT \ln Kp \quad (\text{式 4})$$

μ : 化学ポテンシャル, R : 気体定数, T : 絶対温度, Kp : 圧力による平衡定数

フガシティーの概念を用いたモデルはいくつかあるが、農業環境技術研究所では、大気 (上層・下層), 土

壤(畑地・水田・非農耕地・底質)、水(陸水・海洋)、植生を含む九つの媒体で構成された地球を、方画のグリッドで区分して化学物質の挙動を予測する非定常モデル(NIAES-MMM)を構築した。このモデルの特徴は、対象物質を極性やイオン性がある農薬まで拡大し、対象物質の挙動に温度依存性や農薬の使用方法を考慮し、媒体に水田と畑を導入したことなどである。

II 農薬の効果に及ぼす気候変動の影響

農薬の効果・薬害が気象の影響を受けることはよく知られている。ここでは特に作物と雑草等植物への影響が大きい除草剤について温度との関係を中心に述べる。

1 生物活性

除草剤を植物に処理すると、一般に温度の上昇につれて、生育阻害程度が高まるとともに、阻害の発現時期も早まる。また、阻害が弱い場合は回復時期が早まるとともに、その程度も高まる。そのため、除草剤の処理直後は高温における阻害が強いものの、しばらくすると低温でむしろ高くなることもある(図-5)。

土壌処理型除草剤の残効性は、薬剤の土壌残留性と密接に関連している。例えば、アミド系除草剤のタイヌビエに対する残効期間は、温度の上昇とともに短くなる。これには田面水中濃度の減少が関与することが推定できたものの、薬剤感受性や土壌吸着性は温度の影響をほとんど受けず、温度の上昇とともに吸収量はむしろ増大することから、その要因を総合的に解析する必要がある(奥語ら, 2006; 2007)。

2 吸収・移行

農薬の根部からの吸収や茎葉部への移行は、温度の影響を受ける。水稻数品種を水耕栽培してシメトリンを根

部処理すると、その吸収や移行は、温度上昇とともに高まり、体内に蓄積した(MATSUMOTO and ISHIZUKA, 1984)。この現象には稲の蒸散量が関与すると考えられるため、例えば大気が乾燥した場合も同様の現象が起きると想定できる。しかし、根部からの水の吸収に関与する気孔コンダクタンスや蒸散量は、気温や湿度だけでなく日射強度や風速等も複雑に関与するため、農耕地においては総合的な解析が必要である。

一方、農薬の茎葉からの吸収は、植物のワックス層の性質や表面構造(毛の形態の違いや数等)、さらに農薬の有効成分や補助剤である界面活性剤の質や量によっても大きく影響を受ける。農薬の植物体表面における分解は、大気中と同様に光化学的酸化分解であるため、ここでも温度が影響すると考えられる。その分解速度は、そこにおける滞留時間の影響を受けることから、葉の性質の違いとともに、温度や湿度等が変動要因となり得る。

3 代謝・作用点

前述の Arrhenius の法則は、そもそも物の「温度寿命」を現すものであるが、「 10°C 2 倍則」といわれるように、様々な反応に適用できる。例えば、酵素反応における基質と生成物の間の平衡関係は、式 1 に示したような温度の関数で表すことができる。また、その酵素を阻害する反応には、拮抗・非拮抗・不拮抗と異なる様式があるが、ここでも理論上温度が影響する。しかし、酵素反応の速度は活性化エネルギーの大ききで決定され、酵素存在下では活性化エネルギーが大幅に低下し、結果として反応速度は $10^8 \sim 10^{14}$ 倍の幅で高まることから、Arrhenius の法則を単純に当てはめることはできないと考えられる。実際、「2 吸収・移行」で紹介した水稻品種を用いた試験でも、主に酵素が関与すると想定できるシメトリンの植物体内代謝は、温度上昇の影響をほとんど受けなかった(MATSUMOTO and ISHIZUKA, 1984)。

また、先の個体レベルの吸収機構同様、群落レベルでも、気候変動が要因となって植生が質的・量的に様々に変化すれば、農薬の分解性や移動性にも大きく影響すると考えられる。

おわりに

ここでは、気候変動と農薬の関連のうち温度を中心に述べたが、気候変動そのものが多種多様であり、そこには様々な媒体、溶質(農薬以外の物質も含む)、生命体(動植物・微生物、ここでは作物・病害虫・雑草)が存在し、それぞれ関連しながら時間とともに複雑に変化している。その意味で、「変動する(非定常)複合系」における短期から長期にわたる時間要因を含めた解析が強

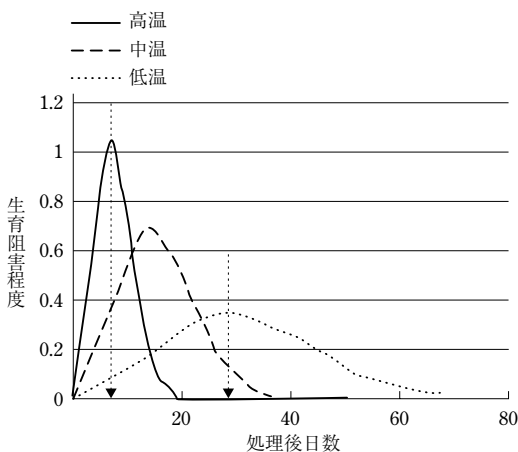


図-5 農薬の生物活性—阻害と回復—

く求められる。これは、ある意味リスク分析の一環であり、気候変動が農薬の効果と挙動に関する影響についても、より科学的な裏付けによるリスク評価やリスク管理を進めるだけでなく、農業資材としての農薬のベネフィットも含めて総合的に分析することが肝要である。今後、新しい発想のインテリジェント製剤の開発も含めて、このような気候変動にも耐え得る技術開発に大いに期待したい。

引用文献

- 1) GUOHONG, X. et al. (2009): Bull. Environ. Contam. Toxicol. **82**: 129 ~ 132.
- 2) 稲生圭哉 (2004): 農業環境技術研究所報告, 第23号. 27 ~ 76.
- 3) 金沢 純 (1992): 農薬の環境科学, 合同出版, 東京, 310 pp.
- 4) KATAGI, T. (2004): Rev. Environ. Contam. Toxicol. **182**: 1 ~ 195.

- 5) 川勝健伸ら (2009): 研究成果第471集, 農林水産技術会議事務局編集・発行, p.336 ~ 341.
- 6) 小原裕三 (2003): 農環研ニュース **57**: 9 ~ 10.
- 7) ——— (2005): 平成17年度革新的農業技術習得研修「高度先進技術研修」(食の安全を支える農業環境データベースの構築とリスク管理への活用) テキスト, p.65 ~ 73.
- 8) MATSUMOTO, H. and K. ISHIZUKA (1984): Weed Research **29**: 159 ~ 164.
- 9) NOYES, P. D. et al. (2009): Environment International **35**: 971 ~ 986.
- 10) TAKAHASHI, N. et al. (1985): Journal of Pesticide Science **10**: 643 ~ 648.
- 11) 奥語靖洋・小原裕三 (2005): 日本農薬学会講演要旨集 **30**: 53.
- 12) ——— (2006): 「農業と環境を考える」農業環境技術研究所研究成果発表会 2006, p.15 ~ 24.
- 13) ———ら (2006): 雑草研究 **51** (別): 142 ~ 143.
- 14) ———ら (2007): 同上 **52** (別): 284 ~ 285.

(参考: 農環研が発行しているものはweb上で公開されています。2), 5), 6), 7), 12))

(新しく登録された農薬27ページからの続き)

だいこん: キスジノミハムシ, アブラムシ類: は種時
かぶ: アブラムシ類, キスジノミハムシ: は種時
こまつな: アブラムシ類, キスジノミハムシ: は種時
みずな: アブラムシ類, キスジノミハムシ: は種時
チンゲンサイ: キスジノミハムシ: 定植時
チンゲンサイ: キスジノミハムシ, アブラムシ類: は種時
非結球あぶらな科葉菜類 (こまつな, みずな, チンゲンサイを除く): アブラムシ類, キスジノミハムシ: は種時
なばな類: アブラムシ類: は種時
だいず: フタスジヒメハムシ: は種時
ほうれんそう: アブラムシ類: は種時
しゅんぎく: ハモグリバエ類: は種時, 定植時
いちご: ワタアブラムシ: 定植時
オクラ: アブラムシ類: 生育期 但し, 収穫14日前まで
さやえんどう: ハモグリバエ類: 生育期 但し, 収穫14日前まで
きく: アブラムシ類, マメハモグリバエ: 定植時
きく: アブラムシ類: 生育期
ガーベラ: マメハモグリバエ, コナジラミ類, アブラムシ類: 定植時
ガーベラ: アブラムシ類: 生育期
花き類・観葉植物 (きく, ガーベラを除く): アブラムシ類: 定植時, 生育期
つつじ類: ツツジグンバイ: 発生初期
●チアメトキサム複合肥料 ※新剤型
22746: キープレイヤー (シンジエンタ ジャパン) 10/06/25
22747: 花色彩 (シンジエンタシード) 10/06/25
チアメトキサム: 1.2%
花き類・観葉植物 (ポット・プランター等の容器栽培): アブラムシ類: 鉢上げ時又は鉢替え時, 生育期

「殺虫殺菌剤」

- フェンプロバトリン・テトラコナゾール液剤 ※新規参入
22731: ナイスプレー (住友化学園芸) 10/06/09
22732: ガーデンケアスプレー (キング園芸) 10/06/09
フェンプロバトリン: 0.010%, テトラコナゾール: 0.0040%

ばら: アブラムシ類, ハダニ類, うどんこ病: 発生時
花き類・観葉植物 (ばら, ガーベラを除く): アブラムシ類, うどんこ病: 発生時
ガーベラ: アブラムシ類, うどんこ病, タバココナジラミ類 (シルバーリーフコナジラミを含む): 発生時
つばき類: チャドクガ: 発生時
きゅうり: アブラムシ類, うどんこ病, ハダニ類: 収穫前日まで
トマト: アブラムシ類, オンシツコナジラミ: 収穫前日まで
●ジメトエート粒剤 ※名称変更
22733: ホクサンジメトエート粒剤 (北海三共) 10/06/09
ジメトエート: 5.0%
三共ジメトエート粒剤 (No.6378) から商品名のみ変更

「殺菌剤」

- 銅水和剤 ※名称変更
22734: ホクサンコサイド DF (北海三共) 10/06/09
水酸化第二銅: 61.4%
三共コサイド DF (No.22217) から商品名のみ変更
●イプロジオン・テブコナゾール水和剤 ※名称変更
22735: ホクサンユキスター水和剤 (北海三共) 10/06/09
イプロジオン: 50.0%, テブコナゾール: 5.0%
三共ユキスター (No.21642) から商品名のみ変更
●プロベナゾール複合肥料 ※処方変更
22736: 明治一発 664 (明治製菓) 10/06/10
22737: くみあいコープガード一発 664 (コープケミカル) 10/06/10
プロベナゾール: 0.60%
稲: いもち病: 湛水直播時, 移植時: 側条施用

「除草剤」

- テフリルトリオン・ピラクロニル粒剤 ※新剤型
22728: ゲットスタージャンボ (日産化学工業) 10/06/09
テフリルトリオン: 10.0%, ピラクロニル: 6.0%
移植水稻: 水田一年生雑草, マツバイ, ホタルイ, ウリカワ, ミズガヤツリ (北海道を除く), ヘラオモダカ (北海道, 東北), ヒルムシロ, セリ (北陸を除く)

(39ページに続く)