

課題名 4-1303 農薬による水田生物多様性影響の総合的評価手法の開発  
 課題代表者名 林 岳彦（国立研究開発法人国立環境研究所環境リスク研究センター  
 環境リスク研究推進室主任研究員）  
 研究実施期間 平成25～27年度  
 累計予算額 93,486千円（うち平成27年度：29,012千円）  
 予算額は、間接経費を含む。  
 本研究のキーワード 農薬、ネオニコチノイド、生物多様性、水田、生態リスク評価、浸透移行性殺虫剤、  
 メソコズム、群集レベル影響評価

#### 研究体制

- (1) 水田メソコズム試験による農薬の生態系影響評価（国立研究開発法人国立環境研究所）
- (2) 農薬の環境中移行動態の予測モデルの構築と検証（国立大学法人東京農工大学）
- (3) フィールド調査による地域レベルの水田生物多様性影響評価（国立大学法人愛媛大学）
- (4) 水田生物多様性の影響評価システムの開発（国立研究開発法人国立環境研究所）

#### 研究概要

##### 1. はじめに(研究背景等)

日本には2.6万km<sup>2</sup>を超える水田が存在し、湿地の代替生息地として生物多様性を維持する重要な役割を果たしている。日本人自身も水田を中心とする里山生態系の中で、その生物多様性が生み出す生産物やサービスを利用して持続型社会を構築してきた。その一方で、農業の集約化により水田生態系は大きく改変されてきた。近年では、化学合成農薬の使用による生物多様性の劣化が議論されており、中でも、全国的に広く使用されているネオニコチノイド系農薬等の水田用浸透移行型殺虫剤については、その残効性と高い殺虫活性により水田生態系に対して深刻な影響を与えることが懸念されている。しかし、その影響に関連する生態学的データの蓄積は緒に就いたばかりである。2010年の生物多様性条約の締約国会議（CBD-COP10）で決議された愛知ターゲットおよび新生物多様性国家戦略においても化学物質の汚染から生物多様性を守る必要性が示され、我が国でも農薬による生物多様性影響の実態解明および対策を急ぐ必要がある。

### 4-1303 「農薬による水田生物多様性影響の総合的評価手法の開発」

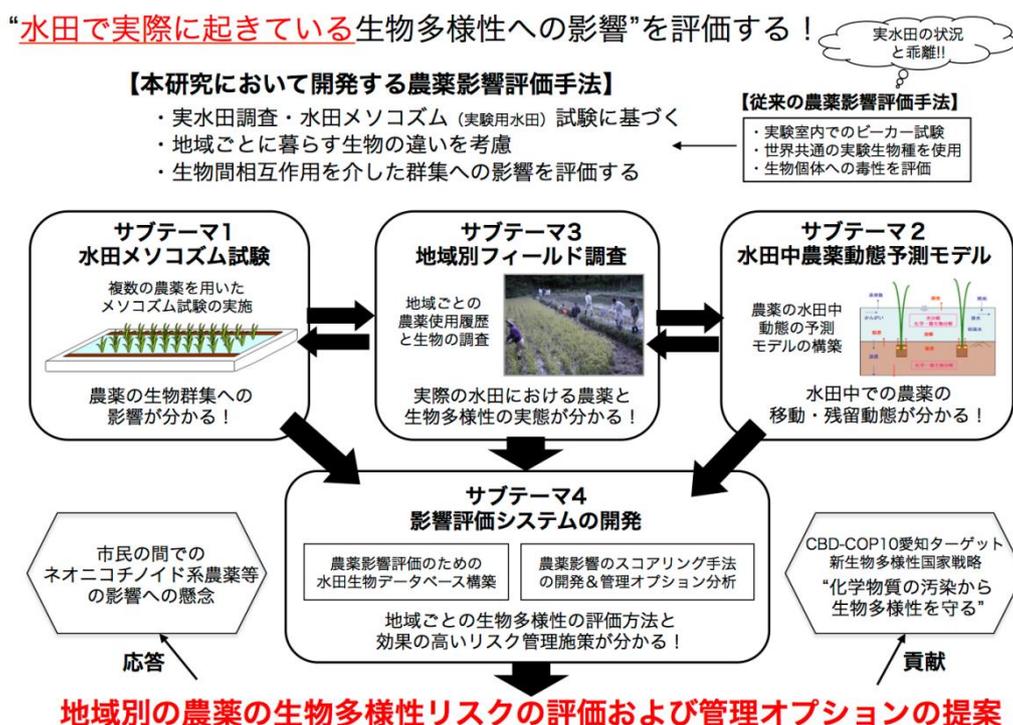


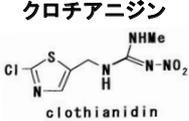
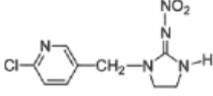
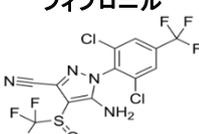
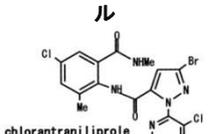
図1 本課題の全体構造および目標

## 2. 研究開発目的

これまで農薬の生態影響評価は、OECDの試験ガイドラインに基づき、標準試験生物の個体レベルでの毒性（致死性等）をビーカー内で評価する手法が採られてきた。この評価法は、農薬の生態リスクの一次評価法として有効ではあるものの、実際の野外生態系を構成する様々な種に対する影響を必ずしも全て反映するものではない。また、農薬も薬剤ごとに物理化学性状が異なるため水田環境中での分解・挙動・残留の動態は一様ではなく、同じ薬剤使用量であっても微小生息地（水中・土表面・土中等）の違いにより各生物種への実質的な曝露量は大幅に異なりうる。そのため、農薬による生物多様性への影響を評価する際には、本来、地域ごとの生態系を構成する種の感受性変異や群集内での種間関係を介した影響を考慮するとともに、薬剤の水田環境中での動態に依存した各生物種への実質的な曝露量の時空間的な変異も考慮する必要がある。

本研究課題は、生物多様性の地域変異および農薬の物理化学性状の違いに起因する各生物種への実質的な曝露量の変異を考慮した、農薬の地域レベルでの生物多様性影響を予測・評価するシステムを構築し、リスク低減のための施策の方向性を提言することを全体目的とする。農薬の生態リスク管理を高度化し、生物多様性保全に繋げるために、従来の毒性学的視点のみに留まらず個体群／群集生態学的視点に基づく評価手法の確立を行う。本研究課題では、全国的に広く使用され、特にその水田生態系への影響が懸念されている4つの浸透移行型水田用殺虫剤（表1）を対象として、4つのサブテーマ研究を基に評価システムを開発する。

表1 本研究課題が対象とする浸透移行型水田用殺虫剤の基礎情報

名称と構造式	クロチアニジン  clothianidin	イミダクロプリド  imidacloprid	フィプロニル  fipronil	クロラントラニプロール  chlorantraniliprole
薬剤の系統	ネオニコチノイド （アセチルコリン受容体を介した神経系作用阻害）	ネオニコチノイド （アセチルコリン受容体を介した神経系作用阻害）	フェニルピラゾール （GABA受容体を介した神経系作用阻害）	ジアミド （リアノジン受容体を介した筋繊維の収縮作用阻害）
登録年	2001	1992	1996	2009
水溶解度(mg/L)	327	510	3.78	1023
土壌吸着定数(Koc)	90.0 ~ 250	175 ~ 376.2	548 ~ 1720	100.1 ~ 527
加水分解性	1.5年 <sup>a)</sup> / 9年 <sup>b)</sup>	安定 <sup>c)</sup>	安定 <sup>c)</sup>	安定 <sup>d)</sup> / 10日 <sup>e)</sup>
水中光分解性	40~42分 <sup>f)</sup>	61分 <sup>f)</sup>	61分 <sup>f)</sup>	0.37日
魚類EC50 <sup>g)</sup> (mg/L)	100 (コイ)	170 (コイ)	0.34 (コイ)	15.0 (コイ)
甲殻類EC50 <sup>h)</sup> (mg/L)	40 (オオミジンコ)	85 (オオミジンコ)	0.19 (オオミジンコ)	0.0116 (オオミジンコ)
藻類IC50 <sup>i)</sup> (mg/L)	> 270	> 100	19	> 2
備考	これらの3剤は農薬登録以来日本における箱苗施用の浸透移行型殺虫剤として広く用いられてきた代表的な薬剤である。海外においても小麦等の種子処理剤等として広く用いられてきているが、EUではミツバチへのリスクの懸念から2013年12月より使用禁止措置が取られている			浸透移行型殺虫剤としては比較的新しい剤であり、近年使用量が増えてきている

a) 25°C, pH 9, 緩衝液. b) 25°C, pH 9, 河川水. c) pH 5~pH 7. d) pH 4~7. e) pH 9. g) 25°C. f) 自然水. g) 96時間での半数影響濃度. h) 48時間での半数影響濃度. i) 72時間での50%増殖阻害濃度.

## 3. 研究開発の方法

### (1) 水田メソゾム試験による農薬の生態系影響評価

#### 1) 実験用野外水田の設計・調査内容・統計解析

農薬が水田の群集構造に及ぼす影響を評価するため、国立環境研究所内の生態系研究フィールド内に、長さ400 cm、× 奥行き170 cmの人工水田8面を利用した実験を行った。実験処理として、フィプロニル施用区、クロチアニジン施用区、クロラントラニプロール施用区、及び農薬を投入しない無施用区について、それぞれ2連ずつ（計8面）の処理を施した。試験は2013、2014、および2015年の各年の5月~9月末の期間に実施した。

水田中に発生する生物の動態・各農薬の水中濃度・土壌中濃度は、移植7日前から収穫日（140日目）まで実施し、試験開始後1か月間は週に1度の頻度で、その後はおおむね2週に1度の頻度でデータを取得し、解析を行った。得られた生物の個体数動態および農薬濃度データに基づき、Principal Response Curve法等を用いて群集構造の経時変化パターンの統計解析を行った。

## 2)大きな影響を受けた種に対する室内毒性試験

トンボ類の幼体(ヤゴ)を対象として、急性毒性試験を実施した。国立環境研究所内で採集したシオカラトンボの雌成虫を産卵させ、孵化した1齢若虫を試験のための供試虫とした。毒性試験は、オオミジンコを対象としたOECDテストガイドライン202を基にトンボ用に改変したものを用いた。曝露後96時間後の活動阻害をエンドポイントとしてEC50(半数影響濃度)の算出を行なった。

## (2)農薬の環境中移行動態の予測モデルの構築と検証

### 1)箱施用殺虫剤とその代謝物の水田環境中動態モデルの構築

まず、湛水条件下での田面水および水田土壌動態の予測数理モデルを、既存の水田農薬動態予測モデル(PCPF-1モデル)を基に構築した。また、稲刈り後の非湛水条件下における土壌コンパートメントでの農薬動態についてのモデルを構築した。さらに、それらのモデルを結合することにより農薬動態の周年シミュレーションを可能とする湛水-非湛水統合農薬動態モデルを開発した。またモデル構築のための室内試験を行い、土壌吸着、光分解、生化学分解等に関するパラメータの定量と設定を行なった。

### 2)農薬の実測データを用いた水田環境中動態モデルの検証とモデルによる薬剤の評価

構築した農薬の水田環境中動態モデルの検証を行うために、サブテーマ1の水田メソコズム、東京農工大学での圃場試験、およびサブテーマ3の実水田からの農薬の実測濃度データを用いてそれぞれのシナリオに基づくモデルによる予測シミュレーション結果の評価を行なった。また、構築したモデルを用いて、フィプロニル、クロロトリニリプロール、クロチアニジン、イミダクロプリドについての環境動態と残留性の評価を行なった。

## (3)フィールド調査による地域レベルの水田生物多様性影響評価

### 1)水田での苗箱使用殺虫剤の実態把握調査

我が国の水稻栽培の苗箱に使用されている殺虫剤成分について、既存の統計資料(日本植物防疫協会・農薬要覧)がよく使われるが、地域の実態調査を生産現場で行い、より正確な現地の使用実態の情報収集を行った。

### 2)全国調査体制の構築と農村フィールド影響評価法の開発

日本の水稻栽培は、北は北海道、南は南九州までと生物地理学的な広がりの中で存立しているが、地域ごとの水田生物多様性の組成や調査研究インフラについて調べながら、全国7地域を選定し、今後の水田生物多様性への影響評価実験の足がかりとなる研究拠点の初期基盤の構築を進めた。それと同時に、担当研究機関のあり、すでに調査インフラの整備された瀬戸内拠点において、サブチーム1のメソコズム水田の結果と相互フィードバックが可能な実際の水田生物多様性の調査手法について試行錯誤を行い、より簡便・効率的で科学的な議論に値する影響評価データの収集方法の確立に向けた諸検討を実地で行った。

### 3)野外水田の生物群集と薬剤濃度の関係性

サブチーム1と2における薬剤濃度の推移予想と半野外実験系メソコズムにおける生物群集と薬剤の関係解析を参考に、サブチーム同様の諸薬剤について、野外の農村に存立する実水田の野外影響評価実験系を設計し、各薬剤成分処理水田における生物群集と各薬剤濃度の動態について調査を行った。

今回、各処理水田群で得られた水田生物多様性を構成する主要種の密度推移について、対照区と各種薬剤処理区で比較検討し、影響評価の指標種について、サブチーム4と連携し選抜した。

## (4)水田生物多様性の影響評価システムの開発

### 1)農薬影響に対する指標種抽出のための水田群集組成データの統計解析

生物群集の組成に与える薬剤の影響とその他の要因の複数の影響の大きさを同時かつ定量的に把握するために、薬剤以外の諸要因による影響を視野に含めた多変量解析を行う必要があった。本解析では、本推進費で得られた2013-2015年度の水田メソコズムおよび既往(2011-2012年度)の水田メソコズムの群集組成に対する主成分分析により、各圃場区画において群集組成がどのような要因(薬剤、年の違い等)と関連を持つかを分析した。また、水田メソコズムデータからの指標種候補の抽出のために、2013-2015年の水田メソコズムデータおよび既往の水田メソコズムデータから、生物種ごとの相対変化率の集計を行い、相対変化率が低い(=負の変化率が大きい)ことを指標種候補の選択における一つの条件として考慮した。

## 4. 結果及び考察

### (1) 水田メソゾム試験による農薬の生態系影響評価

#### 1) 水田中農薬濃度の解析結果

全ての薬剤（フィプロニル・クロチアニジン・クロラントラニプロール）において、水中濃度は投入した1時間後にピークとなり、1週後には比較的low濃度まで減衰し、若干の増減を示すものの濃度は減少傾向だった。しかし、クロチアニジン及びクロラントラニプロールについては、試験終了時においても水中から殺虫成分が検出され、その量も前年度の試験終了時のものよりも増加した。土壌中濃度については、いずれの剤も減少傾向がみられず、初期濃度と同等の濃度値が調査終了時までみられた。

#### 2) 水田中生物動態の解析結果

生物調査によって捕獲されたトンボ以外の昆虫類・プランクトン・その他動物類の種数・種の構成には、薬剤処理による顕著な差はみられなかった。PRC解析の結果、特に最終年度となる2015年において、フィプロニル区における群集動態は他の処理区と比べてその影響の程度は大きくなった（図2）。特に大きな負の影響がみられたのはプランクトン類およびショウジョウトンボ若虫であった。また、ショウジョウトンボ、シオカラトンボについてはフィプロニル区において3年間の試験を通じて大幅な個体数の減少が見られた。また、2015年にはフィプロニル区において両種とともにアキアカネもほぼ羽化数がゼロになるなど顕著な影響が見られた（図3）。トンボの個体数については年次変動によるばらつきも見られるが、これらのトンボ類の減少の原因の一つとして薬剤の連用処理が考えられる。

#### 3) 大きな影響を受けた種に対する毒性試験結果

水田メソゾム試験において顕著な影響がみられたトンボ類のうち、シオカラトンボに対して、クロチアニジン、及びフィプロニルに対する室内急性毒性試験を行った結果、シオカラトンボ1齢若虫における48時間後の半数影響濃度（EC50）はそれぞれ0.00022  $\mu\text{g/L}$ 、及び0.038  $\mu\text{g/L}$ であった。これらのEC50は、水田メソゾムにおいて農薬の投入後の実測濃度と同程度の濃度を示しており、クロチアニジンやフィプロニルによる急性影響が実際の水田においても生じうることを示唆した。

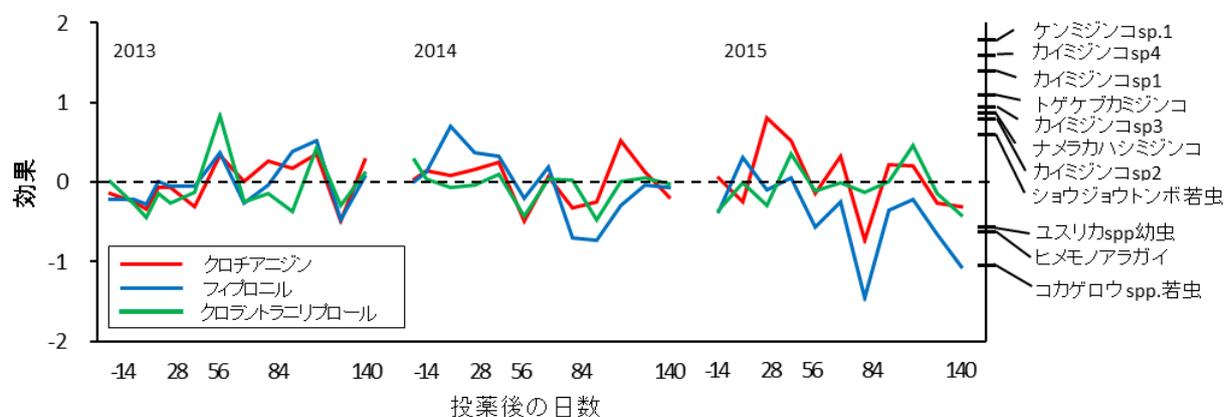


図2 薬剤が生物群集に与える影響 群集の時系列動態のPRC解析結果.

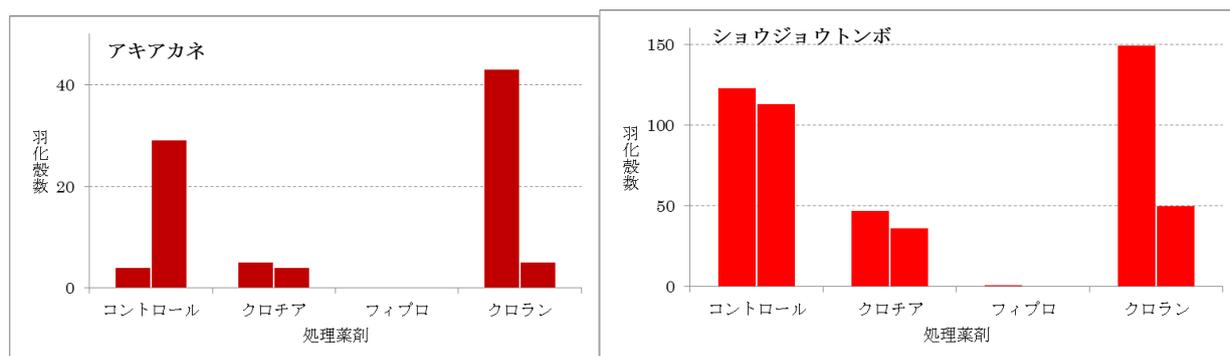


図3 2015年試験における各水田からの主なトンボ類羽化総数.

## (2) 農薬の環境中移行動態の予測モデルの構築と検証

### 1) 箱施用殺虫剤とその代謝物の水田環境中動態モデルの構築

本研究における湛水モデルは湛水モデルの既存のモデルであるPCPF-1を基として開発を行なった。また、刈取り後の非湛水条件での農薬動態シミュレーションを行うモデルを、開発中の畑土壤中農薬動態モデルSPECを改良し構築した。さらに、湛水条件での水田農薬動態予測モデルと非湛水条件での畑土壤農薬動態モデルを結合することにより、農薬の長期残留予測を可能とするモデルを構築した(図4)。

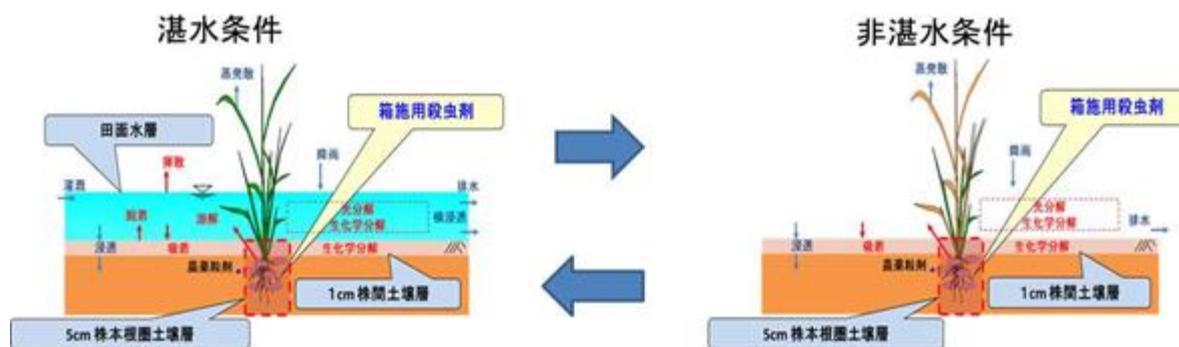


図4 湛水-非湛水統合農薬動態モデル概念図

### 2) 農薬の実測データを用いた水田環境中動態モデルの検証とモデルによる薬剤の評価

サブテーマ1の水田メソコズム、東京農工大学での圃場試験、およびサブテーマ3の実水田からの農薬の実測濃度データを用いて、構築した農薬の水田環境中動態モデルの検証を行った。その結果、水管理条件や農薬処理条件が既知の場合には、薬剤の水田環境中動態を高い精度で予測できることが示された。また、本研究のモデルシミュレーションによる評価から、フィプロニル、イミダクロプリド、クロチアニジン、クロラントリニプロールの環境動態と残留性の比較が以下のようにまとめられた。

フィプロニルは、田面水においては光分解における半減期が短く、また水溶解度も低く、土壌吸着性が比較的高い。土壌中からの溶出や田面水中の濁度による光分解への影響を考慮に入れても、田面水中の濃度は低く推移するため、移動性は低いと考えられた。一方土壌では、水田土壌中半減期は12-26日であり、長期残留特性は低いと考えられた。

イミダクロプリドとクロチアニジンは、その物理化学性がよく類似している。イミダクロプリドもクロチアニジンも光分解速度が非常に速い。イミダクロプリドの田面水中半減期は約2日であるが、クロチアニジンの水溶解度はイミダクロプリドと同様に高く、田面水中濃度もイミダクロプリドと同程度に比較的高い。よって田面水の流出および循環灌漑等で水田集水域内外に移動拡散する可能性はイミダクロプリドとクロチアニジンは同様に高いと考えられる。土壌中半減期は農薬動態パラメータで比較するとイミダクロプリドとクロチアニジンはフィプロニルより長く、土壌吸着性が比較的高いことから、それらの残留性はフィプロニルより高いと考えられる。

クロラントリニプロールは、他の2薬剤と比較して水溶解度が低いが、田面水中の濃度は水田メソコズムの場合も、下記の実圃場調査の場合も他の薬剤と同等の濃度レベルであった。水田土壌においては、土壌吸着係数はイミダクロプリドやクロチアニジンと同等もしくは低い報告がされている。土壌中の分解半減期は、酸化性土壌で597日、畑土壌で204日と報告されており、水田メソコズム試験データによるモデル入力値の調整の結果でも半減期が228日となっている。このため、水田土壌での長期残留の可能性が3薬剤の中では一番高いと考えられる。しかし土壌浸透などによる土壌からの脱着が顕著な場合は、土壌からの脱着やリーチングにより迅速な消長が期待される。

## (3) フィールド調査による地域レベルの水田生物多様性影響評価

### 1) 水田での苗箱使用殺虫剤の実態把握調査

フィプロニル、クロラントリニプロール、クロチアニジン、イミダクロプリドが主要な苗箱農薬として全国の水稻栽培で使用されていること、そして、どの薬剤成分を使用するかは、地域や生産農家の病害虫防除の意思決定などによって多様性があることが認められた。

## 2) 全国調査体制の構築と農村フィールド影響評価法の開発

平成25年度は、瀬戸内拠点として愛媛県内3か所、広島県内1か所の野外実験系を現地設営しながら、影響評価手法の試行錯誤を進め、各種生物の密度が推定できる枠すくい取り法を提案し生物群集組成の調査を行った。その結果、愛媛県内3か所の水田から60種前後が採集でき、時系列の生物群集の動態から影響評価のための調査は、移植後1か月内外の期間を中心に行うことが妥当とされた。平成26年度以降は、研究拠点でより簡便で効率的で全国一斉調査に資することのできる実際的な調査手法を確立し、その傍らで、関東、北陸、南九州、最終年度には東北・北海道を加えた全国調査の初期研究基盤をつかった(図5)。

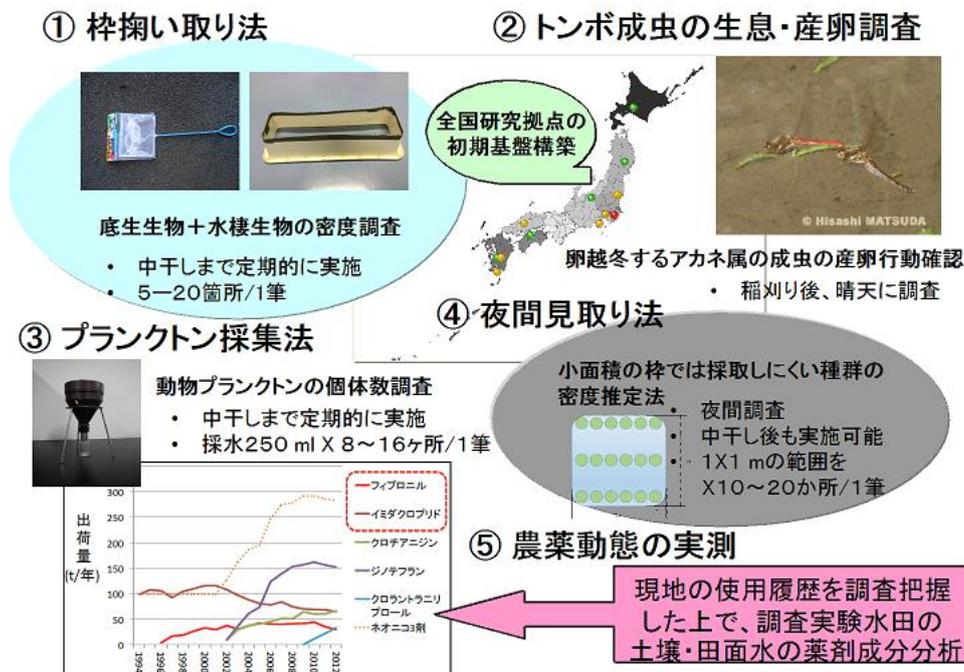


図5 野外水田の影響評価手法の開発と全国展開

これらの全国調査から、各地域ごとの生物群集の種組成に多様性が認められた。またその一方で、全国の野外水田に共通する出現種として、ナツアカネなどのアカネ属などが示された(図6)。各地域ごとに使用されている苗箱農薬の種類と生物種の多様性の複雑な関係性が予想された。

### 3) 野外水田の生物群集と薬剤濃度の関係性

サブチーム1の水田メソコズムと同様の、3年間の各種薬剤連用実験を瀬戸内拠点の2地域の水田地帯で実施した。開始2年目の平成26年度までは、両地域とも対照区と他の薬剤処理区間で、生物群集組成や特定種群の密度動態にとりわけ明瞭な差異は認められなかった。しかしながら、各種薬剤を3年連用した平成27年度では、2つの地域ともフィプロニル区ではトンボ類のヤゴ類の密度は調査上ゼロとなり、水田メソコズムと同様のフィプロニル連用処理によると思われるトンボ類への負のインパクトが示唆された(図6)。野外実験を行った2地域におけるトンボ類の種のなかで、サブテーマ1の水田メソコズムと同じなのはシオカラトンボのみであった。2地域の現地水田ではウスバキトンボ、ナツアカネ、アキアカネ、マユタテアハネ、アオモンイトトンボ、カトリヤンマ、ギンヤンマの発生が3年間を通して確認されている。フィプロニルおよび他の薬剤の影響について、他の種群について対照区との密度差異の検討を行ったが、ミジンコ類などヤゴ類の餌となる種群の密度に薬剤の負の影響は認められなかった。

それぞれの処理区について、田面水中と土壌中の薬剤成分濃度について調べた。さらに、念のために2地域の慣行苗箱農薬の主殺虫成分として10年間は連用されてきているイミダクロプリドについても、注水代掻き前や代掻き後薬剤処理前の土壌や田面水実測濃度を調べたところ、どの水田でもイミダクロプリドの濃度が処理水田と同等のオーダーで検出された(図6)。以上から、野外水田における農薬の影響は、単にその年に施用した薬剤成分の生物群へのインパクトだけではなく、残留か流入かは現在不明であるが、その水田地帯の履歴として使用されてきた薬剤のインパクトも加わり、水田生物多様性に影響を与えているという新しい農薬影響の実態が初めて明らかとなった。

今回の農村現地における野外水田の調査結果から、農薬の水田生物多様性への影響評価を行う場合には、必ず事前の農薬利用履歴を個別生産者スケールから農村地域スケールで調べ、使用薬剤の連用にも気を配ることが重要であることが示された。指標種としては広域に移動しながら水田に産卵し、水田注水後に発生する

トンボ類 やコマツモムシ、マツモムシといった半翅目が苗箱農薬指標種の候補としてあげられた。

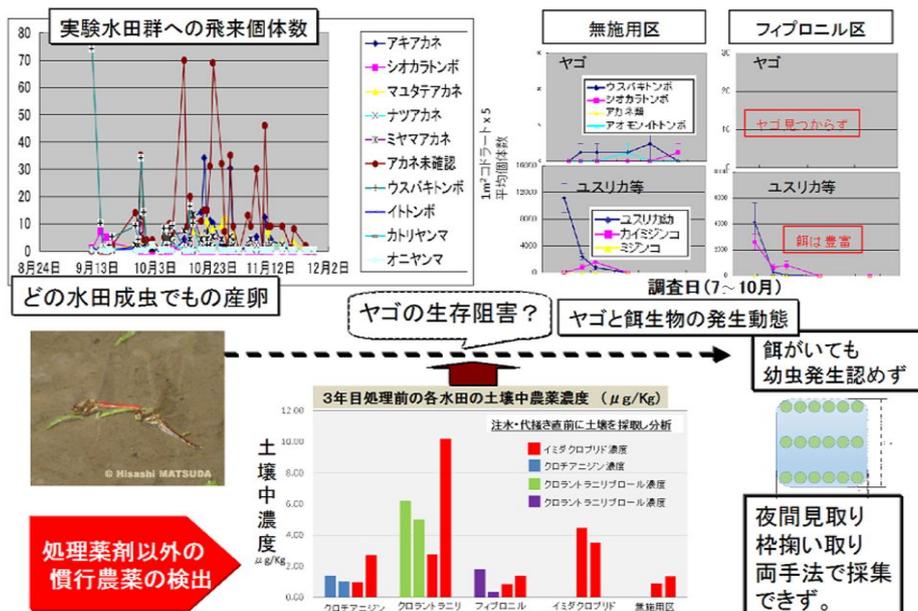


図5 野外水田におけるアカネ属の孵化時における薬剤成分濃度とヤゴ類と餌生物群集、およびトンボ類成虫の生息・産卵状況 (H27年度)

図6 野外水田におけるアカネ属の孵化時における薬剤成分濃度とヤゴ類と餌生物群集、およびトンボ類成虫の生息・産卵状況 (H27年度)

#### (4) 水田生物多様性の影響評価システムの開発

サブテーマ1の水田メソコズム群集データの多変量解析および各薬剤における各生物種の相対変化率の解析から、つくば市における主要かつ安定的な指標種としては、シオカラトンボ、ショウジョウトンボ、アキアカネを採用することが適切であり、また、イトミズ、ナメラカハシミジンコ、コミズムシ、ユスリカ幼虫、キベリヒラタガムシ、アオモンイトトンボ等も農薬影響の補足的な指標種として有用であることが示された。また、それらの指標種への影響を基に水田群集への影響を総合的に評価するためのシステムの構築を行い、今回対象とした4剤(フィプロニル・クロチアニジン・クロラントラニリプロール・イミダクロプリド)の評価を行なったところ、フィプロニルの水田生態系への影響が最も懸念されるという結論が得られた。

各農薬を施用した場合におけるリスク予測とリスク削減の施策の方向性の提言は以下の通りまとめられた。

フィプロニルの連用を続けた場合の水田生物へのリスクについては、サブテーマ1とサブテーマ3の結果から、水田内のトンボ類に顕著な減少がもたらされることが予想される。水田圃場における農薬濃度については、サブテーマ1とサブテーマ3の結果から、水中濃度については速やかな減少が予想される。しかしながら、水中濃度が低いにも関わらず水田の一部の水生生物に対する強い影響が見られていることから、水中濃度を生態リスクの指標とすることはできないと結論される。特にフィプロニルの農薬濃度の評価においては、代謝・分解産物の濃度の評価も併せて行う必要がある。また、土壌への接触や摂餌経路での土壌を介した曝露の存在についても評価を行う必要がある。フィプロニルが連用されている水田における生態リスク削減の対策としては、もしたんぼ類の保全を一義的な目的とするならば、クロラントラニリプロール等のトンボ類への毒性が一般に低い農薬への代替を進めることが一つの有力な候補となると考えられる。また、他の農薬への代替後もフィプロニルが複数年にわたり圃場中に比較的高濃度で残りつづける可能性があるため、フィプロニルおよびその代謝・分解物も含めて継続的に土壌中濃度の変化を把握することが必要である。

クロチアニジンの連用を続けた場合の水田生物へのリスクについては、サブテーマ1とサブテーマ3の結果から、比較的広範な種群において中程度の減少がもたらされることが予想される。施用の規模と期間によっては、比較的感受性の強い種や内的自然増殖率の低い種については個体数の著しい減少に繋がる可能性もあり、トンボ類を中心に影響を継続的に調査する必要があると考えられる。水田圃場における農薬濃度については、土壌中に長期間残留する傾向が示唆されており、クロチアニジンの連用を続けた場合には長期的な土壌中濃度変化を把握することが望ましい。クロチアニジンが連用されている水田における生態リスク削減の対策としては、リスクの高いトンボ類などの調査を継続的に行うとともに、高濃度での曝露が生じている水田土壌および水中濃度の継続的な調査が有効である。

クロラントラニリプロールの連用を続けた場合の水田生物へのリスクについては、サブテーマ1とサブテーマ3の

結果から、トンボ類に対してのリスクは一般に小さいことが予想される。しかしながら、ミミズ・鞘翅目・半翅目等へのリスクは必ずしも小さいと予想されるわけではないため、トンボ類以外の生物への調査も継続的に調査する必要があると考えられる。水田圃場における農薬濃度については、土壤中に長期残留する強い傾向が示唆されており、連用における薬剤の残留については注視が必要である。継続的な実測により長期的な土壤中濃度の変化を把握する必要があると考えられる。

イミダクロプリドの連用を続けた場合の水田生物へのリスクについては、既往のメソコズム実験およびサブテーマ3の結果から、比較的広範な種群において中程度の減少がもたらされることが予想される。施用の規模と期間によっては、比較的感受性の強い種や内的自然増殖率の低い種については個体数の著しい減少に繋がる可能性もあり、トンボ類を中心に影響を継続的に調査する必要があると考えられる。水田圃場における農薬濃度については、サブテーマ3から長年の連用が行われてきた水田土壌において残留由来と思われる高濃度のイミダクロプリドが実測されており、特に長期連用の水田圃場においての高濃度の曝露が懸念される。イミダクロプリドについては長年にわたり主要な箱苗施用剤として用いられてきた経緯があり、まずこれまでの累積的な使用による残留が現在の水田中での濃度にどの程度影響しているかを明らかにすることが急務である。

## 5. 本研究により得られた主な成果

### (1) 科学的意義

- 1) 今回メソコズム試験をおこなった薬剤（フィプロニル、クロチアニジン、クロラントラニリプロール）について、土壌中において一定の残留がみられることが明らかになり、今後、浸透移行性殺虫剤の環境影響評価において、土壌中の残留・動態に留意する必要があることが示された。
- 2) 今回メソコズム試験をおこなった薬剤のうち、フィプロニルが他の薬剤と比べて生態影響が大きいことが示唆され、浸透移行性殺虫剤間にも生態影響の程度に差があることが示された。さらに、農薬の影響は特にトンボ類の動態に対して顕著に現れることが示唆された。また、同様のトンボ類への顕著な影響が生じている可能性が野外の実水田でも示唆された。
- 3) 箱施用殺虫剤の長期残効性の評価に関して、湛水条件での農薬動態予測モデルと非湛水条件での農薬動態予測モデルを結合した湛水-非湛水統合農薬動態モデルを構築した。室内試験、水田メソコズム試験、圃場試験を通して予測モデルの検証および評価を行い、それらの結果から得られた知見により、箱施用殺虫剤の水田環境での通年動態予測、環境影響評価が可能となった。
- 4) 野外水田における農薬の影響は、単に連用した薬剤成分の生物群への影響だけではなく、残留か流入かは現在不明であるが、その水田地帯の履歴として使用されてきた薬剤の影響も加わり、水田生物多様性に影響を与えているという新しい農薬影響の実態が初めて明らかとなった。
- 5) 水田生物多様性の影響評価システムの開発により、水田圃場環境下での農薬の曝露実態および影響の大きさを考慮した総合的な評価に基づく管理施策に関する提言を行うことが技術的に初めて可能となった。

### (2) 環境政策への貢献

#### < 行政が既に活用した成果 >

特に記載すべき事項はない。

#### < 行政が活用することが見込まれる成果 >

- 1) 環境省・水産動植物の被害防止に係る農薬登録保留基準の設定において、感受性の種間差、種のライフサイクルと曝露影響の関係、土壌を介した曝露等、現行システムでカバーできないリスクを評価するために、2015年度より水産動植物登録保留基準の運用・高度化検討会が開設されており、本事業の成果がリスク評価の高度化の検討にあたり、科学的知見として活用される。
- 2) 地方自治体においても、農薬による生物多様性影響評価を推進するにあたり、本事業で開発されたメソコズム試験や野外調査手法・解析手法、さらに農薬の環境中移行動態の予測モデルが活用される。
- 3) 今後、既存および新規の農薬について、ある農薬の使用に伴いある種が減少しているという情報が報告された、あるいは、ある農薬の使用量があるトリガーを超えた、という場合に、今回開発された影響評価システムを適用することにより、より早くかつ効率的にそれらの農薬による水田生物多様性影響についての一連の科学的知見を得ることが可能となった。

## 6. 研究成果の主な発表状況

### (1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) 五箇公一、早坂大亮:環境毒性学会誌(Jpn. J. Environ. Toxicol.) 16: 21-28(2013)「農薬の生態リスク評価は生物多様性を守れるか? ~高次リスク評価法としてのメソコズム試験を通して~」
- 2) Kasai A, Hayashi T I, Ohnishi H, Suzuki K, Hayasaka D and Goka K: Scientific Reports. DOI: 10.1038/srep23055 (2016) 「Fipronil application on rice paddy fields reduces densities of common skimmer and scarlet skimmer」
- 3) J. Boulange, D. Thuyet, P. Jaikaew and H.Watanabe: Pest Manag Sci, 72: 1178-1186 (2016) DOI 10.1002/ps.4096 (2015), Simulating the fate and transport of nursery-box-applied pesticide in rice paddy fields.

### (2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) H. Watanabe, J. Boulange, J. Piyanuch, F. Malhat, A. Saber: The 1st International Conference on Environment, Livelihood, and Services: Environment for Life. November 2-5, Bangkok, Thailand. The Chaipattana Foundation and The Kasetsart University. The Centara Grand and Bangkok Convention Center at Central World 2015. "Monitoring and Modeling of Pesticide Fate and Transport in Agricultural Environments." (Invited key note speech, Abstract No. A04004 )
- 2) 五箇公一:日本自然保護協会シンポジウム「ネオニコチノイド系農薬の生態系影響」(2015)「ネオニコチノイド系農薬の生態リスク評価および実態」
- 3) 林岳彦:第63回日本生態学会(2016)「ネオニコチノイド農薬による水田生物多様性影響評価から見えたもの」
- 4) 笠井 敦・林 岳彦・大西一志・鈴木一隆・杉田典正・早坂大亮・五箇公一:第60回日本応用動物昆虫学会大会(2016)「フィプロニルの箱苗施用がトンボ相に及ぼす影響」

## 7. 研究者略歴

課題代表者:林 岳彦

東北大学理学部卒業、理学博士、現在、国立環境研究所主任研究員

研究分担者

- 1) 五箇 公一  
京都大学農学部卒業、現在、国立環境研究所生態リスク評価・対策研究室室長
- 2) 渡邊 裕純  
University of California、Davis. Department of Biological and Agricultural Engineering卒業、現在、東京農工大学大学院農学府教授
- 3) 日鷹一雅  
広島大学大学院生物圏科学研究科修了、現在、愛媛大学大学院農学研究科准教授

## 4-1303 農薬による水田生物多様性影響の総合的評価手法の開発

### (1) 水田メソコズム試験による農薬の生態系影響評価

国立研究開発法人国立環境研究所

生物・生態系環境研究センター 主席研究員室 五箇公一

<研究協力者>

国立研究開発法人国立環境研究所 主席研究員室 笠井敦

近畿大学農学部環境管理学科 保全生態学研究室 早坂大亮

平成25(開始年度)～27年度累計予算額：40,459千円（うち平成27年度：10,713千円）

予算額は、間接経費を含む。

#### [要旨]

これまで我が国ではOECDのテストガイドラインに準じて、農薬による生態リスク評価を行ってきた。具体的には、農薬取締法において魚類、甲殻類および藻類への急性毒性試験データが求められる。しかし室内ビーカーレベルの毒性データのみで実際の野外環境における生態影響の複雑なプロセスおよび影響の大きさを推定することは困難であり、現実性に乏しい。近年、特に水田において多用されるネオニコチノイド系を含む新型の浸透移行性殺虫剤は、現行の法的リスク評価において、特に魚類やミジンコ類に対する毒性が低く、生態系影響が低いと評価されたうえで登録されているが、本系統剤が野外で使用されるようになって以降、各地で水田に生息する昆虫類、特にトンボ類の著しい減少が報告されており、実際の水田環境における新型浸透移行性殺虫剤の生態影響について実態把握が急がれる。

本課題では、水田メソコズムを複数設置し、近年使用量が多い浸透移行性殺虫剤3剤（フィプロニル、クロチアニジン、およびクロラントラニリプロール）を水田に処理することで水田中の生物相にどのような影響が生じるのかを定量的に評価した。2013年から2015年の3年間、春の田植え時に上記薬剤を処理後、春から秋にかけての水田中の生物種および農薬の水中・土壌中濃度の動態を定期的に調査した。その結果、薬剤によって、水田中の生物相に及ぼす影響の大きさやパターンに違いがあること、特にトンボ類は、薬剤間の影響の違いが顕著に現れることが示された。また、いずれの薬剤も長期間（最低でも1年間）は土壌中に比較的高濃度で残留することが示された。

#### [キーワード]

メソコズム、群集、PRC解析、残留、トンボ

## 1. はじめに

この地球上には、様々な生物種が地域ごとの環境に適応して進化し、独自の生態系を構成しており、この様々な生態系の機能がお互いにリンクして補足し合うことで、地球全体に生物が安定して生息できるエリアとして生物圏を生み出している。このように生物進化の産物としての多様な遺伝子や、種、生態系が地球上に展開している状態を「生物多様性」という。近年、人間活動の増大により、環境破壊が進行して、野生生物の絶滅速度を加速しているとされる。このまま絶滅を放置すれば、生物多様性が崩壊して、生態系機能も麻痺し、結果的に人間社会の安定性も脅かすのではないかと懸念されている。こうした状況の中、生物多様性の保全は地球環境問題の最重要課題の一つと位置づけられ、1992年リオデジャネイロで開催された地球環境サミットで生物多様性条約が締結された。

化学物質による生態系影響も生物多様性保全の観点から議論されており<sup>1)2)3)4)</sup>、化学物質の生態リスク評価は、環境科学・生態学分野において重要性がさらに高まってきている<sup>5)6)</sup>。これまでOECD（経済協力開発機構）をはじめとする国際機関により、化学物質リスク評価のためのテストガイドライン整備が進められており、我が国も加盟国として、化学物質関連の国内法の整備を行ってきた。2004年度には化学物質審査法、2005年度には農薬取締法が改正され、それぞれ化学物質の登録申請にあたり生態リスク評価データの取得が義務づけられることとなった。具体的には、化審法では、魚類（メダカなど）、甲殻類（ミジンコなど）、および藻類に対する毒性データが求められ、農薬取締法では、従来のコイへの毒性評価に加え、甲殻類および藻類への毒性評価が求められる。さらに農薬取締法では、毒性評価のみならず、暴露評価が追加され、化学物質の環境中予測濃度が水生生物に対する急性影響濃度を上回る場合には、登録が保留される。一方、これらの生態影響評価は室内毒性評価を機軸としており、実際場面での生態影響あるいは生物多様性影響の概念からはまだ大きく乖離したものと言わざるを得ない。何より、生態学分野において化学物質が生態系を攪乱している実態を詳細に捉えた研究例は乏しい。

近年、特に水田において多用されるネオニコチノイド系を含む新型の浸透移行性殺虫剤は、現行の法的リスク評価において、魚類やミジンコ類に対する毒性が低く、生態系影響が小さいと評価されたうえで登録されているが、本系統剤が野外で使用されるようになって以降、各地で水田に生息する昆虫類、特にトンボ類の著しい減少が報告されており<sup>7)8)</sup>、実際の水田環境における新型浸透移行性殺虫剤の生態影響について実態把握が急がれる。

## 2. 研究開発目的

本課題では、模擬（実験）生態系として水田メソコズムを用いて、浸透移行型殺虫剤による水田内の生物相の変化を種数・個体数をパラメータとして経時的に調査し、これら農薬がおよぼす群集レベルの影響を評価することとした。得られたデータをもとに室内ビーカーレベルでの評価では予測困難な生態系影響評価の検討を進めることとした。また、個体群レベルでもっとも敏感に反応する生物種を特定し、指標生物としての適性を検討することとした。

### 3. 研究開発方法

#### 【平成25年度】

##### (1) 実験用野外水田の反復設計

農薬が水田の群集構造に及ぼす影響を評価するため、国立環境研究所内の生態系研究フィールド（実験圃場）内に、長さ400 cm、× 奥行き170 cmの人工水田を8面設置した（図(1)-1）。水田の構造として土壌深度70cmで土壌の下には塩化ビニルシートを張り、地下および水平方向への流出を抑えた。畦畔部分を15cm確保し、田面水水深は4cmとした。田面水はオーバーフロー式とし、常に一定の水位が保たれるようにした。試験区としてフィプロニル処理区、クロチアニジン処理区、クロラントラニプロール処理区、及び農薬を投入しない無処理区をそれぞれ2連ずつ設けた。これらの試験3薬剤は、現在までに水田用箱苗剤として広く用いられており、さらに物理化学性状および作用機構が異なる薬剤として選定された。

平成25年度は試験開始1か月前の4月中旬に研究所内の地下水を用いて湛水し、野外生物群集の自然発生を促した。その後、試験開始24 時間前（5月13日）に前述3種の市販箱苗処理用農薬を投与し、苗に農薬を浸透移行させた後、翌日5月14日に手植えを行い、試験を開始した。試験は平成25年5月7日から10月2日にかけて実施した。



図(1)-1 水田メソコズム試験状況

##### (2) 水田中に発生する生物動態・農薬濃度についてのモニタリング

水田中に発生する生物の動態・各農薬の水中濃度・土壌中濃度について以下のスケジュールでモニタリングをおこなった。残留農薬、水質及び生態調査は、移植7日前から収穫日（140日目）

まで実施し、試験開始後1か月間は週に1度の頻度で、その後はおおむね2週に1度の頻度でデータを取得し、解析を行った。

### (3) 得られたデータに基づく群集構造の経時変化パターンの解析

得られた生物の個体数動態および農薬濃度データに基づき、Principal Response Curve法等を用いて群集構造の経時変化パターンの統計解析をおこなった。

### (4) 大きな影響を受けた種に対する毒性試験

上記試験を通してトンボ類若虫（ヤゴ）の発生量に農薬の影響が顕著に現れると評価されたことから、試験水田で発生するトンボ3種、ショウジョウトンボおよびシオカラトンボのヤゴについて、急性毒性試験を実施した。国立環境研究所内にて各種トンボ6雌を採集して室内にて産卵させ、孵化した1齢若虫を試験のための供試虫とした。毒性試験は、オオミジンコを対象としたOECDテストガイドライン202の方法と可能な限り同じ設計と条件を用いて行った。試験区として、対照区および7濃度のフィプロニル区を設けた。試験溶液10mLに対しトンボの1齢若虫を5匹導入したものを総計で1濃度区あたり4反復（=1雌親あたり5反復×4雌親）作成し、25℃の暗黒条件下に置き、4・24・48・72・96時間後の生死、並びに活動状況を実体顕微鏡下で確認した。試験容器を静かに動かしても15秒間動きが見られない場合、活動阻害と判断した。濃度反応曲線およびEC50（半数影響濃度）の算出は対数ロジスティック回帰により行った。

## 【平成26年度】

### (1) 実験用野外水田の反復設計

農薬が水田の群集構造に及ぼす影響を評価するため、昨年度に引き続き、国立環境研究所内の生態系研究フィールド内に、長さ400 cm、× 奥行き170 cmの人工水田8面を利用した。昨年度設定したフィプロニル処理区、クロチアニジン処理区、クロラントラニリプロール処理区、及び農薬を投入しない無処理区それぞれ2連ずつに昨年度と同じ処理を施した。試験開始6日前の5月2日に研究所内の地下水を用いて湛水し、野外生物群集の自然発生を促した。その後、試験開始24時間前（5月12日）に前述3種の市販箱苗処理用農薬を投与し、苗に農薬を浸透移行させた後、翌日5月13日に手植えを行い、試験を開始した。試験は平成26年5月7日から10月1日にかけて実施した。

### (2) 水田中に発生する生物動態・農薬濃度についてのモニタリング

水田中に発生する生物の動態・各農薬の水中濃度・土壌中濃度について以下のスケジュールでモニタリングをおこなった。残留農薬、水質及び生態調査は、移植7日前から収穫日（140日目）まで実施し、試験開始後1か月間は週に1度の頻度で、その後はおおむね2週に1度の頻度でデータを取得し、解析を行った。

### (3) 得られたデータに基づく群集構造の経時変化パターンの解析

得られた生物の個体数動態および農薬濃度データに基づき、Principal Response Curve法等を用いて群集構造の経時変化パターンの統計解析をおこなった。

#### (4) 大きな影響を受けた種に対する毒性試験

試験水田で優占するシオカラトンボのヤゴについて、急性毒性試験を実施した。国立環境研究所内で採集したシオカラトンボのそれぞれ4雌を産卵させ、孵化した1齢若虫を試験のための供試虫とした。毒性試験は、オオミジンコを対象としたOECDテストガイドライン202の方法と可能な限り同じ設計と条件を用いて行った。試験区として、対照区および5濃度のクロチアニジン区、及びフィプロニル区を設けた。試験溶液10mLに対しシオカラトンボの1齢若虫を5匹導入したものを総計で1濃度区あたり4反復(=1雌親あたり5反復×4雌親)作成し、25℃の暗黒条件下に置き、4・24・48・72・96時間後の生死、並びに活動状況を実体顕微鏡下で確認した。試験容器を静かに動かしても15秒間動きが見られない場合、活動阻害と判断した。濃度反応曲線およびEC50(半数影響濃度)の算出は対数ロジスティック回帰により行った。

### 【平成27年度】

#### (1) 実験用野外水田の反復設計

農薬が水田の群集構造に及ぼす影響を評価するため、昨年度に引き続き、国立環境研究所内の生態系研究フィールド内に、長さ400 cm、×奥行き170 cmの人工水田8面を利用した。昨年度設定したフィプロニル処理区、クロチアニジン処理区、クロラントラニリプロール処理区、及び農薬を投入しない無処理区それぞれ2連ずつに昨年度と同じ処理を施した。平成27年度試験開始19日前の5月2日に研究所内の地下水を用いて湛水し、野外生物群集の自然発生を促した。その後、試験開始24時間前(5月11日)に前述3種の市販箱苗処理用農薬を投与し、苗に農薬を浸透移行させた後、翌日5月12日に手植えを行い、試験を開始した。試験は平成27年5月2日から9月29日にかけて実施した。

#### (2) 水田中に発生する生物動態・農薬濃度についてのモニタリング

水田中に発生する生物の動態・各農薬の水中濃度・土壌中濃度について以下のスケジュールでモニタリングをおこなった。残留農薬、水質及び生態調査は、移植7日前から収穫日(140日目)まで実施し、試験開始後1か月間は週に1度の頻度で、その後はおおむね2週に1度の頻度でデータを取得し、解析を行った。

#### (3) 得られたデータに基づく群集構造の経時変化パターンの解析

得られた生物の個体数動態および農薬濃度データに基づき、Principal Response Curve (PRC) 解析等を用いて群集構造の経時変化パターンの統計解析を行った。

#### (4) 大きな影響を受けた種に対する毒性試験

シオカラトンボのヤゴを対象として、急性毒性試験を実施した。国立環境研究所内で採集したシオカラトンボの雌成虫を産卵させ、孵化した1齢若虫を試験のための供試虫とした。毒性試験は、オオミジンコを対象としたOECDテストガイドライン202を改良した。試験区として、対照区および5濃度のクロチアニジン区、及びフィプロニル区を設けた。試験溶液10mLに対しシオカラトンボの1齢若虫を5匹導入したものを総計で1濃度区あたり4反復作成し、25℃の暗黒条件下に置き、4・24・48・72・96時間後の生死、並びに活動状況を実体顕微鏡下で確認した。試験容器を静かに動

かしても15秒間動きが見られない場合、活動阻害と判断した。濃度反応曲線およびEC50（半数影響濃度）の算出は対数ロジスティック回帰により行った。

#### 4. 結果及び考察

##### 【H25年度】

##### （1）水田中農薬濃度の解析結果

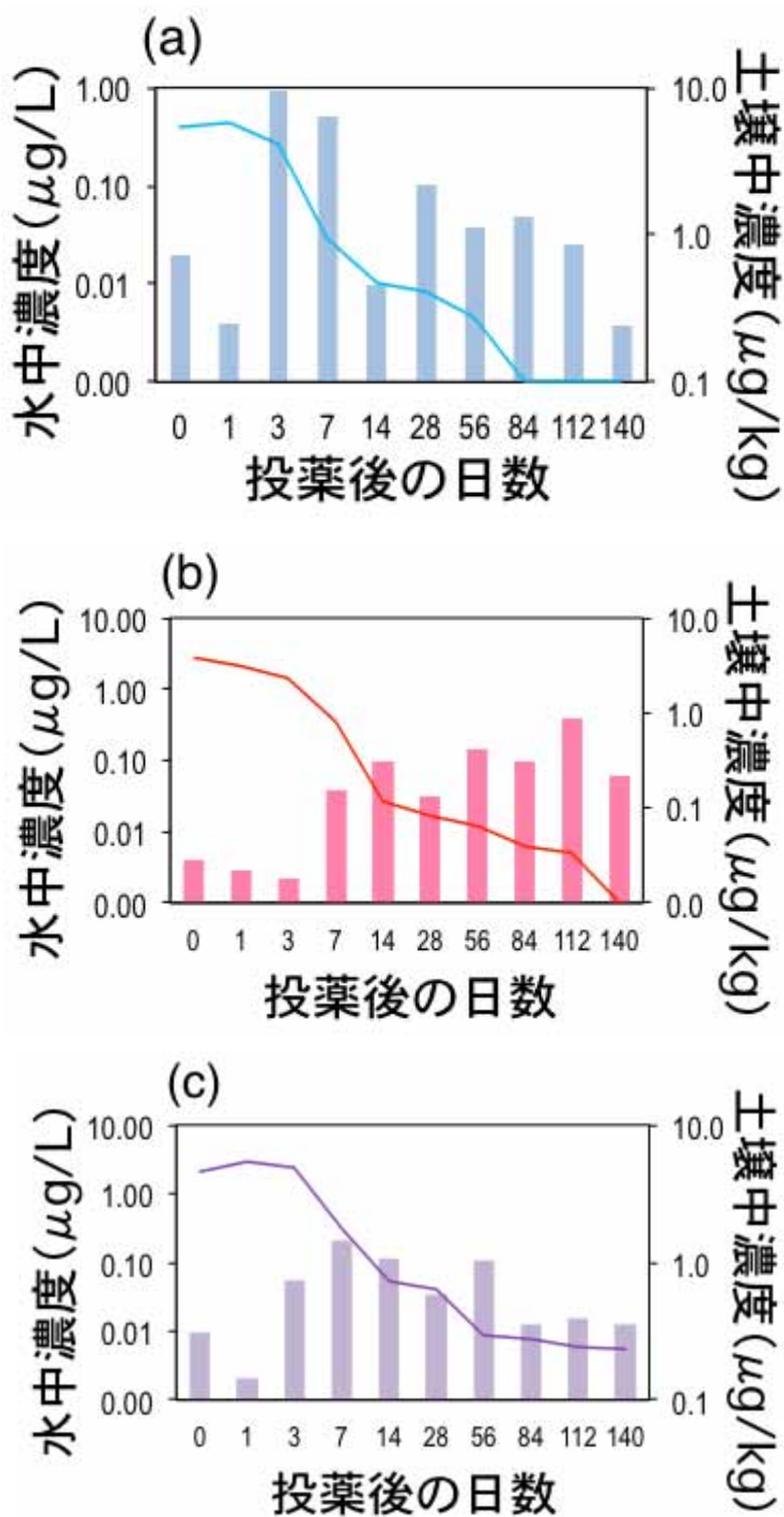
全ての薬剤において、水中濃度は投入翌日にピークとなり、1週間には比較的低濃度まで減衰しそのまま濃度は一貫して減少した（図(1)-2）。土壤中濃度については、フィプロニルにおいては3日後にピークとなり、2週後以降は比較的低濃度となるものの一定量の蓄積がみられた。クロチアニジンおよびクロラントラニリプロール投入区においては、土壤中濃度は3～7日後から徐々に上昇し、そのまま低濃度での一定量の蓄積がみられた。水田の濁度において、クロラントラニリプロール処理区はコントロールより有意に低い値を示した（ $p < 0.05$ 、Dunnetの検定）。

##### （2）水田中生物動態の解析結果

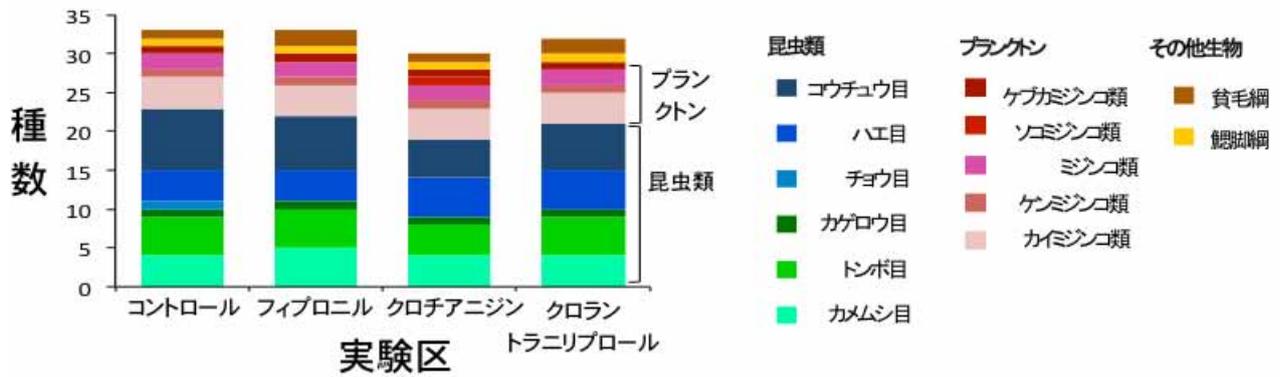
生物調査によって捕獲された昆虫類・プランクトン・その他の種数・種の構成には、薬剤処理による大きな差はみられなかった（図(1)-3）。時系列データへの多変量解析法であるPRC解析の結果、フィプロニル区における群集動態は他の処理区と比べて薬剤の影響を強く受ける傾向がみられた（図(1)-4a）。特に大きな影響がみられたのはトンボ類であり、フィプロニル区においては、ショウジョウトンボの捕獲総数は他の処理区と比べて顕著に低かった（ $p < 0.05$ 、Tukey法による多重比較；図(1)-4b）。シオカラトンボについても、捕獲総数が全体的に少ないために統計的に有意とはならなかったものの（ $p = 0.056$ 、Dunnetの検定）、フィプロニル区において個体数がほぼゼロになるなど大幅な個体数の減少が見られた（図(1)-4b）。プランクトン調査において、クロラントラニリプロール処理区で一時的にコントロールとの間に有意に値が低い場合がみられた（ $p < 0.05$ 、Dunnetの検定；図(1)-5a）。ベントス調査において、薬剤処理区はいずれもコントロール区と比べて、ピーク密度が低く抑えられていた（ $p < 0.05$ 、Dunnetの検定；図(1)-5b）。

##### （3）大きな影響を受けた種に対する毒性試験結果

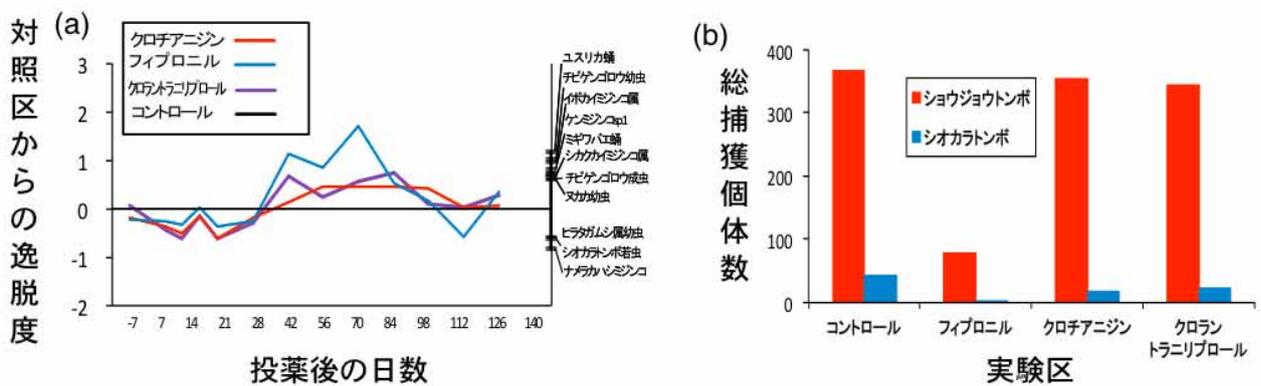
水田メソコズム試験において顕著な影響がみられたトンボ類に対して、フィプロニルに対する毒性試験を行った結果、シオカラトンボ1齢若虫における72時間後の半数影響濃度（EC50）は $0.26 \mu\text{g/L}$ であった。また、ショウジョウトンボ1齢若虫における72時間後のEC50は $0.19 \mu\text{g/L}$ であった。これらのEC50は、水田メソコズムにおいて農薬の投入後の実測濃度と同程度の濃度を示しており、フィプロニルによる急性影響が実際の水田においても生じうることを示唆している。



図(1)-2 各薬剤における水中および土壌中残留濃度の推移  
 (a) フィプロニル、(b)クロチアニジン、(c)クロラントラニリプロール。実線：水中濃度、棒グラフ：土壌中濃度。縦軸は対数軸であることに注意。

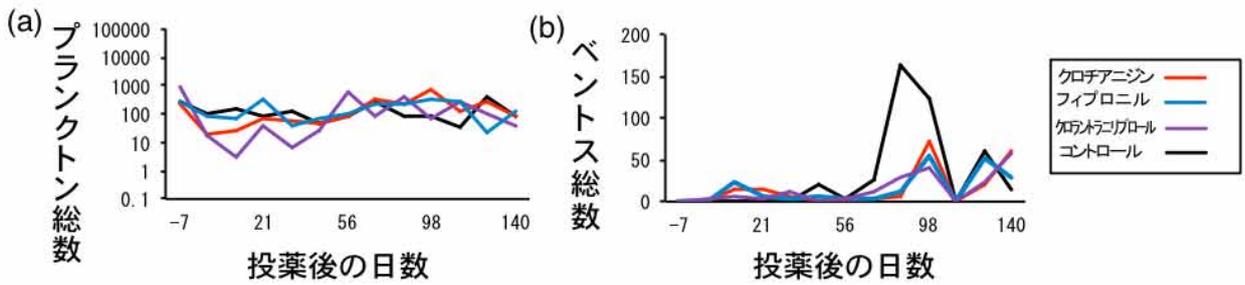


図(1)-3 水田メソコズム試験における薬剤処理ごとの出現種数



図(1)-4 薬剤が生物群集およびトンボ類に与える影響

(a) 群集の時系列動態のPRC解析結果. (b) 各処理区からのショウジョウ・シオカラトンボの総捕獲数.



図(1)-5 水田メソコズム試験における薬剤処理ごとの生物動態

(a) プランクトン総数、(b) ベントス総個体数.

#### (4) 水田メソコズム試験による農薬の生態系影響評価の結果まとめ

以上をまとめると、次の4点に要約される。(1)いずれの薬剤も、水中濃度は投入直後に最高濃度を示し、その後一貫した濃度低下がみられた。(2)いずれの薬剤も、土壌中においては比較的濃度ながら一定の残留がみられた。(3)今回調査をおこなった薬剤のうち、フィプロニルが他の薬剤と比べて生態影響が大きい傾向がみられた。(4)水田メソコズムにおいてフィプロニルの影響は特にトンボ類において顕著であり、室内毒性試験からも実水田において生じうる程度の濃度レベルにおいてシオカラトンボ・ショウジョウトンボに急性影響が生じることが示された。

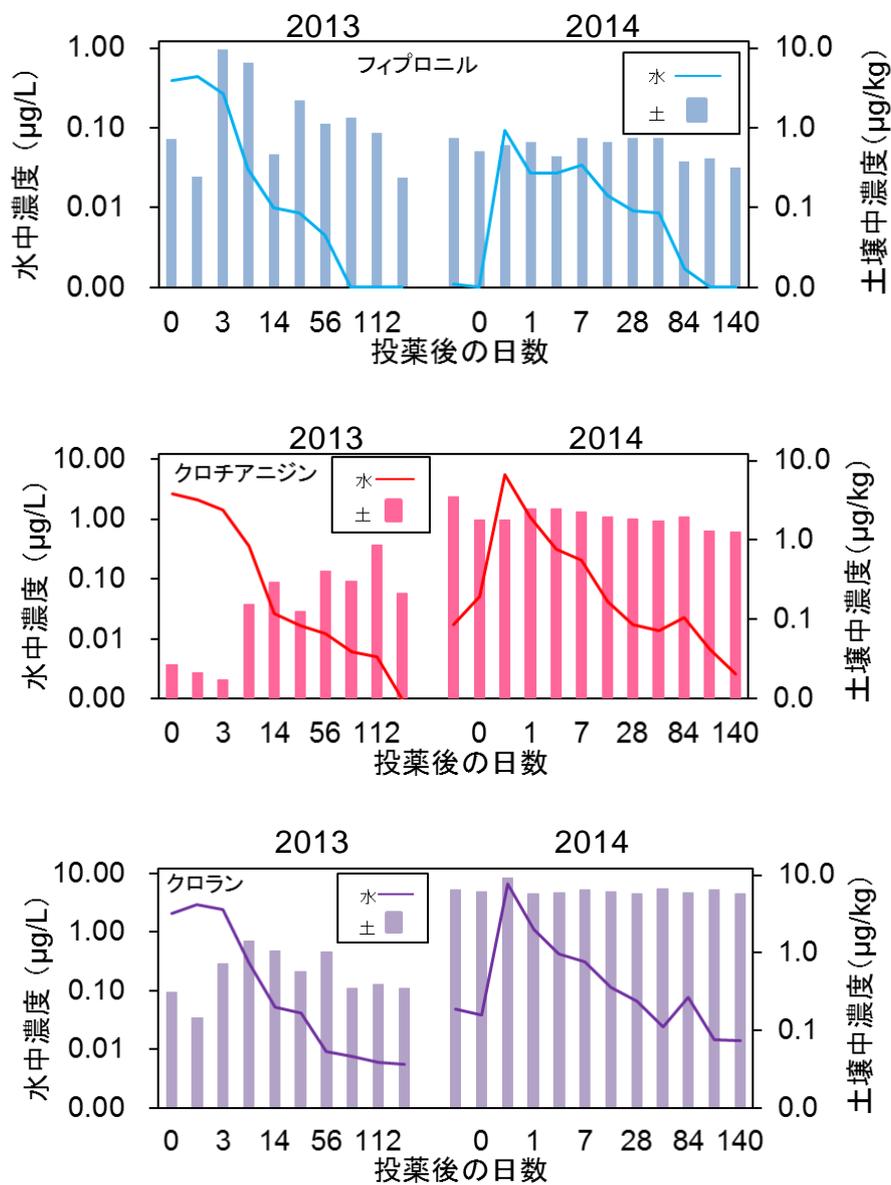
#### 【平成26年度】

##### (1) 水田中農薬濃度の解析結果

全ての薬剤において、水中濃度は投入した1時間後にピークとなり、1週間には比較的濃度まで減衰し、若干の増減を示すものの濃度は減少傾向だった(図(1)-6)。土壌中濃度については、フィプロニルおよびクロラントラニリプロールにおいては明瞭なピークが見られず、クロチアニジンは投入1週間前にピークを示した。いずれの剤も減少傾向がみられず、投入当初と同等の蓄積が調査終了時までみられた。

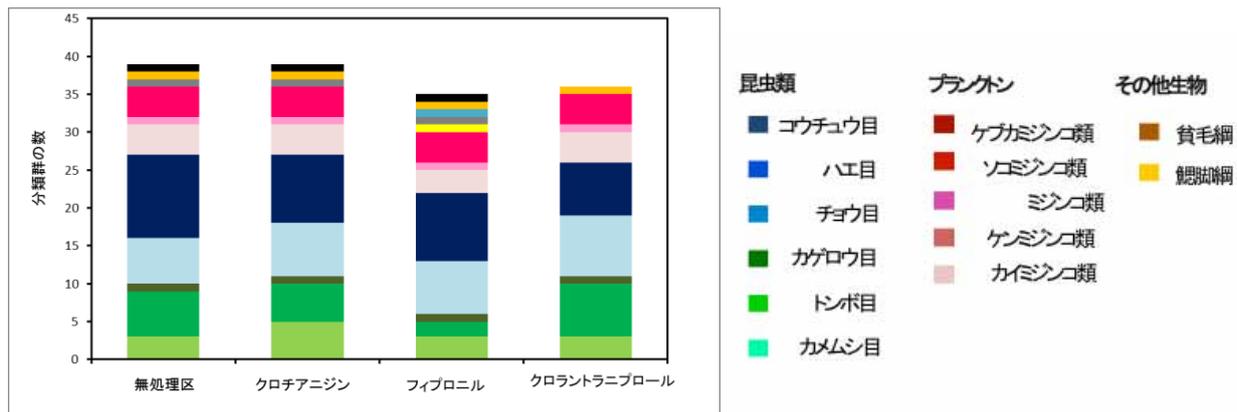
##### (2) 水田中生物動態の解析結果

フィプロニル区は他の区と比べてトンボ類の発生種数が少なかった(図(1)-7)。生物調査によって捕獲されたトンボ以外の昆虫類・プランクトン・その他の種数・種の構成には、薬剤処理による大きな差はみられなかった(図(1)-7)。PRC解析の結果、クロラントラニリプロール区における群集動態は他の処理区と比べて薬剤の影響を強く受ける傾向がみられた(図(1)-8)。特に大きな影響がみられたのはヒラタガムシ類およびコミズムシであった(図(1)-8)。シオカラトンボの捕獲総数がクロチアニジン、及びフィプロニル区において個体数がゼロになるなど大幅な個体数の減少が見られた(図(1)-9)。フィプロニル区ではショウジョウトンボに関しても個体数がほぼゼロとなり、大幅な個体数の減少がみられた(図(1)-9)。

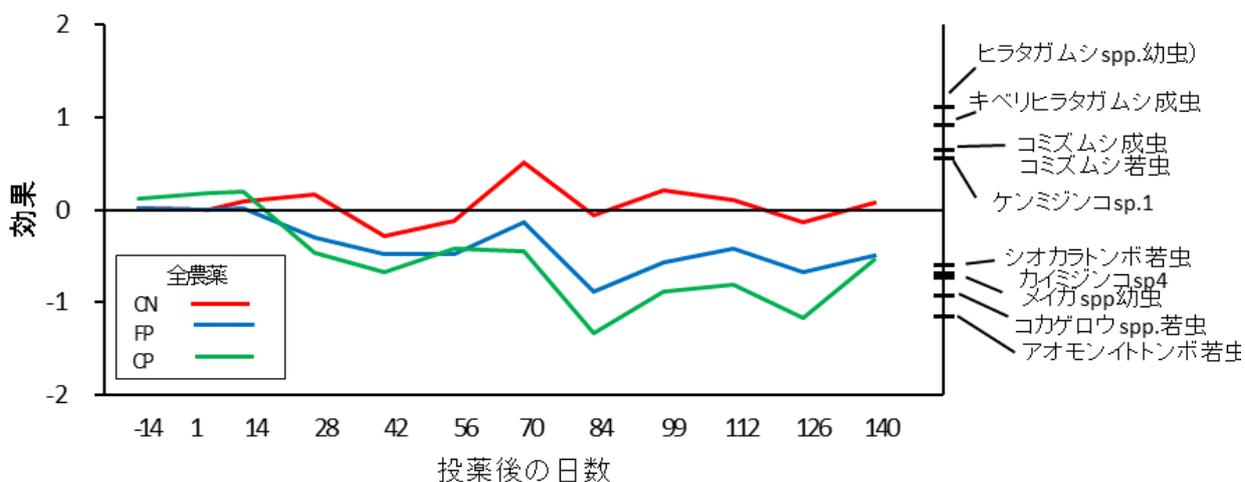


図(1)-6 各薬剤における水中および土壌中残留濃度の推移

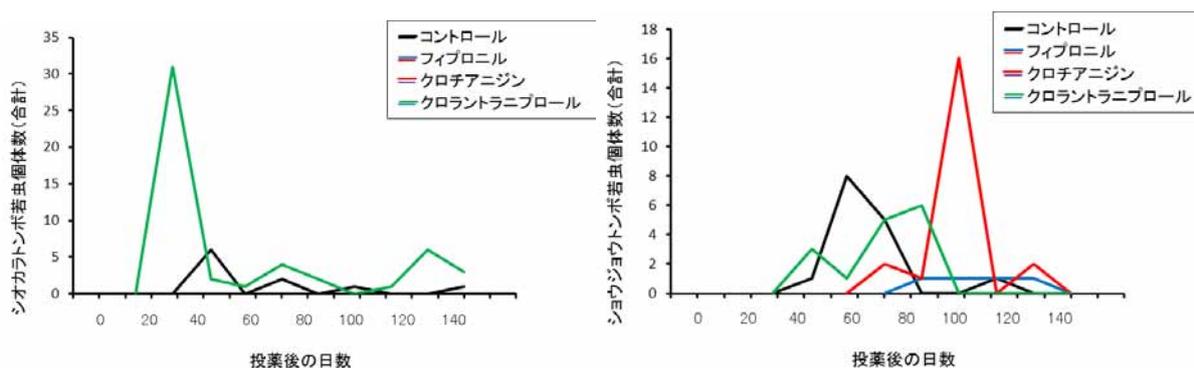
(a) フィプロニル、(b)クロチアニジン、(c)クロラントラニリプロール．実線：水中濃度．棒グラフ：土壌中濃度．縦軸は対数軸であることに注意．



図(1)-7 水田メソコズム試験における薬剤処理ごとの出現種数



図(1)-8 薬剤が生物群集に与える影響 群集の時系列動態のPRC解析結果.



図(1)-9 薬剤がトンボ類に与える影響. 左: シオカラトンボ、右: シヨウジョウトンボ

### (3) 大きな影響を受けた種に対する毒性試験結果

水田メソコズム試験において顕著な影響がみられたトンボ類に対して、クロチアニジン、及びフィプロニルに対する毒性試験を行った結果、シオカラトンボ1齢若虫における48時間後の半数影響濃度（EC50）はそれぞれ0.00022  $\mu\text{g/L}$ 、及び0.038  $\mu\text{g/L}$ であった。これらのEC50は、水田メソコズムにおいて農薬の投入後の実測濃度と同程度の濃度を示しており、フィプロニルによる急性影響が実際の水田においても生じうることを示唆している。

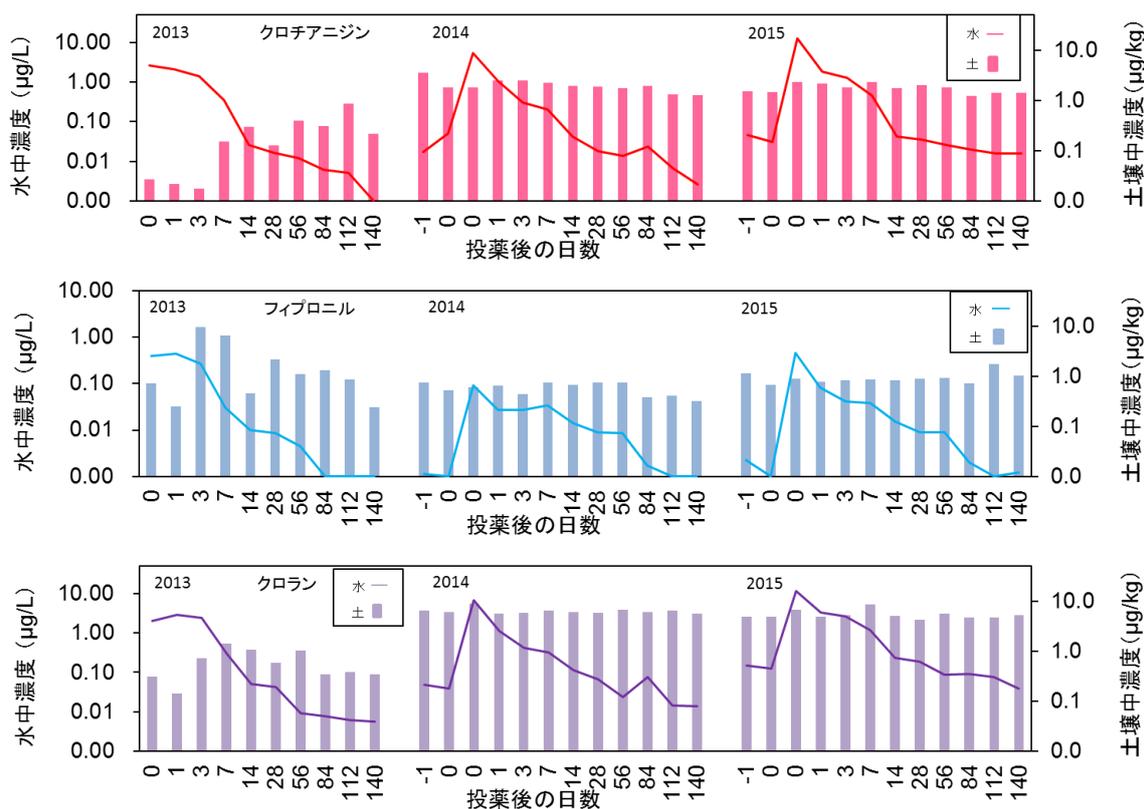
### (4) 水田メソコズム試験による農薬の生態系影響評価の結果まとめ

以上をまとめると、次の4点に要約される。(1)いずれの薬剤も、水中濃度は投入直後に最高濃度を示し、その後一貫した濃度低下がみられた。(2)いずれの薬剤も、土壌中においては投入前から高濃度の蓄積が見られ、調査終了までほとんど減少しなかった。(3)今回調査をおこなった薬剤のうち、クロラントラニリプロールが他の薬剤と比べて生態影響が大きい傾向がみられた。(4)水田メソコズムにおいてフィプロニルの影響は特にトンボ類において顕著であり、室内毒性試験からも実水田において生じうる程度の濃度レベルにおいてシオカラトンボ・ショウジョウトンボに急性影響が生じることが示された。また、クロラントラニリプロールの影響はヒラタガムシ類及びコミズムシにおいて顕著であった。

## 【平成27年度】

### (1) 水田中農薬濃度の解析結果

全ての薬剤において、水中濃度は投入した1時間後にピークとなり、1週間には比較的low濃度まで減衰し、若干の増減を示すものの濃度は減少傾向だった（図(1)-10）。しかし、クロチアニジン及びクロラントラニリプロールについては、試験終了時においても水中から殺虫成分が検出され、その量も前年度の試験終了時のものよりも増加した。土壌中濃度については、いずれの剤も減少傾向がみられず、初期濃度と同等の濃度値が調査終了時までみられた。



図(1)-10 各薬剤における水中および土壌中残留濃度の推移 (上) クロチアニジン、(中)フィプロニル、(下)クロラントラニリプロール。実線：水中濃度。棒グラフ：土壌中濃度。縦軸は対数軸であることに注意。

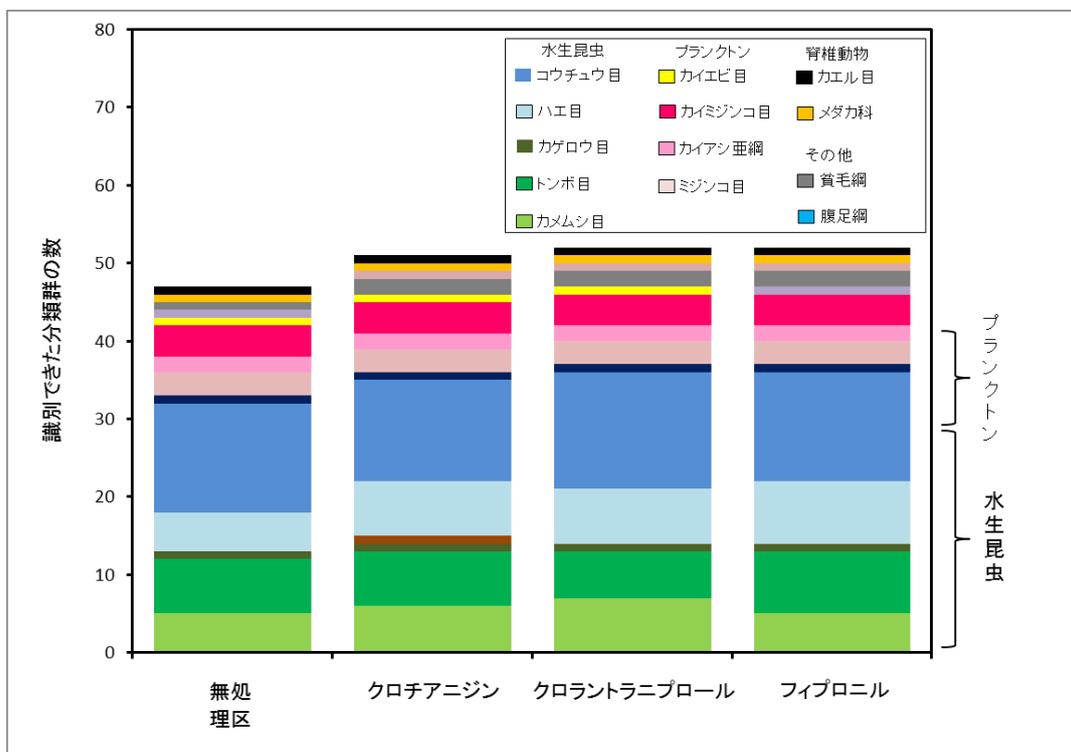
## (2) 水田中生物動態の解析結果

生物調査によって捕獲されたトンボ以外の昆虫類・プランクトン・その他動物類の種数・種の構成には、薬剤処理による顕著な差はみられなかった (図(1)-11)。PRC解析の結果、フィプロニル区における群集動態は他の処理区と比べて薬剤の影響を強く受け、その程度は年毎に大きくなる傾向がみられた (図(1)-12)。特に大きな負の影響がみられたのはプランクトン類およびショウジョウトンボ若虫であった (図(1)-12)。また、アキアカネ・ショウジョウトンボ、及びシオカラトンボの羽化総数がフィプロニル区においてほぼゼロになるなど大幅な個体数の減少が見られた (図(1)-13)。トンボ類は水田群集の頂点に位置するため、これら3種トンボ類の減少は薬剤の直接的な毒性影響と餌生物の減少による間接影響の両方を反映すると考えられた。これらの結果から、ショウジョウトンボ、及びシオカラトンボのトンボ類若虫の動態は、今回試験した薬剤の生態系影響を総合的に評価する上での指標生物として有効と考えられた。尚、2015年のみアキアカネへの影響を見ることができたのは、2014年の秋～冬期の水管理方法の改善により、2014年の秋にメソコズム試験圃場へのアキアカネの産卵を促すことができたためである。アキアカネについては2015年の1年のデータしか得られていないため、農薬影響に対する指標生物としての有効性についてはさらなる検討が必要であると考えられる。

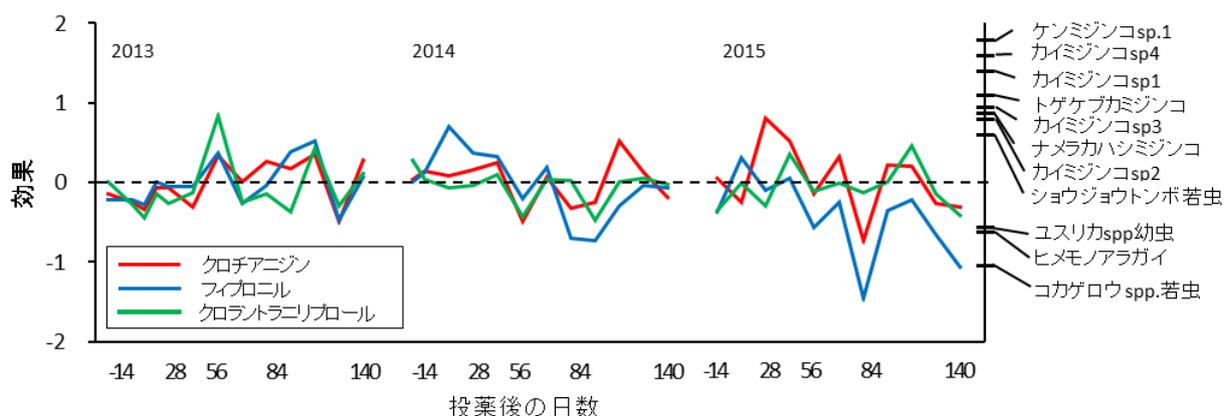
## (3) 大きな影響を受けた種に対する毒性試験結果

水田メソコズム試験において顕著な影響がみられたトンボ類のうち、シオカラトンボに対して、

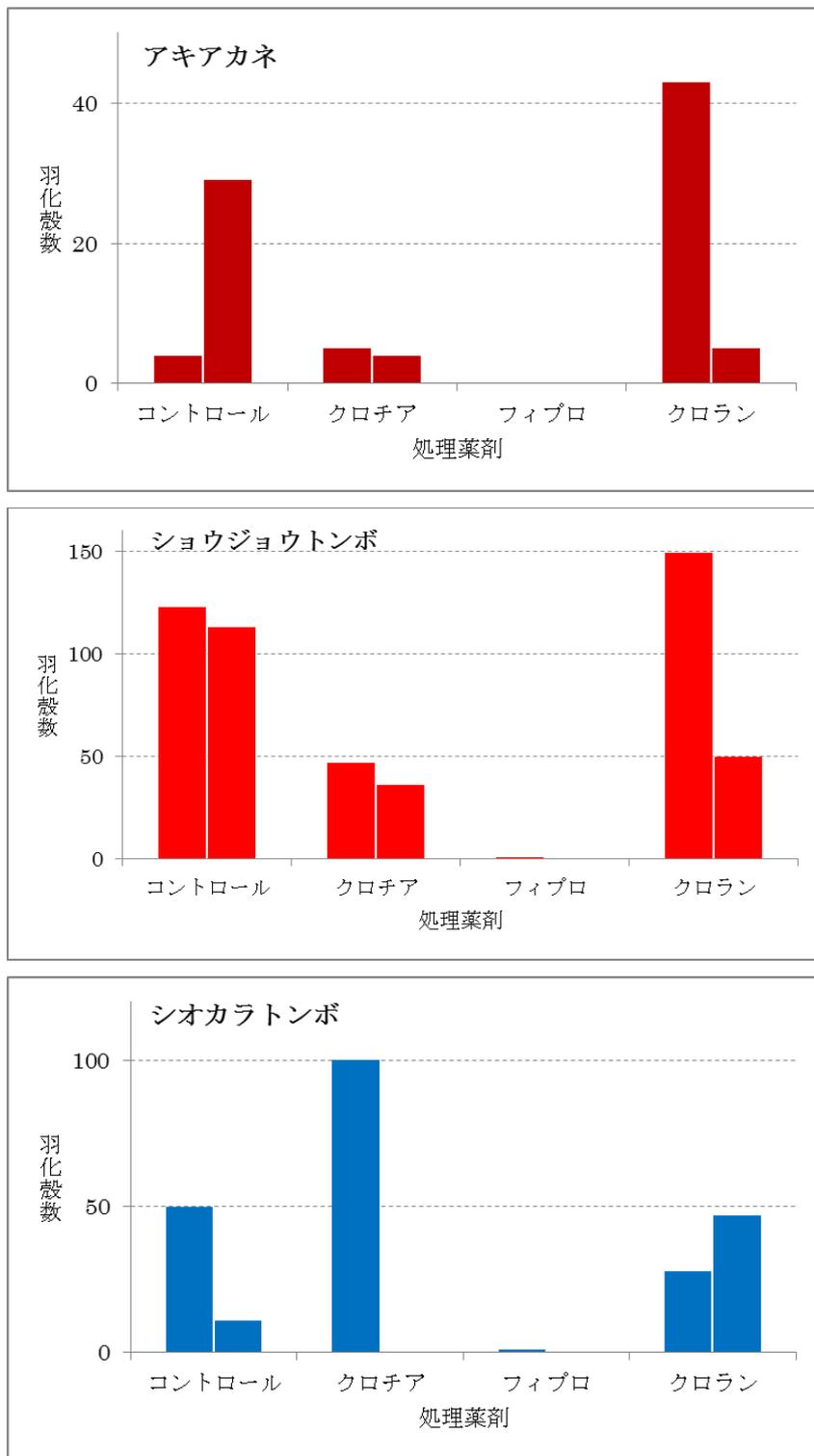
クロチアニジン、及びフィプロニルに対する急性毒性試験を行った結果、シオカトンボ1齢若虫における48時間後の半数影響濃度（EC50）はそれぞれ0.00022 µg/L、及び0.038 µg/Lであった。これらのEC50は、水田メソコズムにおいて農薬の投入後の実測濃度と同程度の濃度を示しており、フィプロニルによる急性影響が実際の水田においても生じうることを示唆している。



図(1)-11 水田メソコズム試験における薬剤処理ごとの出現種数



図(1)-12 薬剤が生物群集に与える影響 群集の時系列動態のPRC解析結果.



図(1)-13 2015年試験における各水田からの主なトンボ類羽化総数.

#### (4) 三年間の水田メソコズム試験による農薬の生態系影響評価の結果まとめ

以上をまとめると、次の4点に要約される。

- (1) いずれの薬剤も、水中濃度は投入直後に最高濃度を示し、その後経時的濃度低下がみられた。フィプロニルはシーズン後半に検出限界以下まで低下したものの、クロチアニジン、及びクロラントラニリプロールはシーズン終了時においても水中から成分が検出された。
- (2) いずれの薬剤も、土壌中においては投入前から高濃度の蓄積が見られ、調査終了まで濃度低下が認められず、その傾向はクロラントラニリプロールで特に顕著だった。
- (3) 水生生物に対する生態影響については、今回調査をおこなった薬剤のうち、フィプロニルがもっとも大きいと考えられた。
- (4) 水田メソコズムにおいてフィプロニルの影響は特にトンボ類において顕著であり、室内毒性試験からも実水田における暴露濃度レベルにおいてシオカラトンボ・ショウジョウトンボに急性影響が生じることが示された。また、その生態影響、すなわち群集構造の変化の程度が年毎に増加することは、土壌中における残留性と関係するものと考えられ、フィプロニルを長期に渡って使用することにより、さらに生態影響が増加することが予測される。ただし、クロチアニジンやクロラントラニリプロールに関しても土壌中の残留は顕著であり、これらの剤についても異なる生物種で生態影響が現れるかもしれないことに注意が必要と判断された。

### 5. 本研究により得られた成果

#### (1) 科学的意義

- 1) 今回メソコズム試験をおこなった薬剤（フィプロニル、クロチアニジン、クロラントラニリプロール）について、土壌中において一定の残留がみられることが明らかになり、今後、浸透移行性殺虫剤の環境影響評価において、土壌中の残留・動態に留意する必要があることが示された。
- 2) 今回メソコズム試験をおこなった薬剤のうち、フィプロニルが他の薬剤と比べて生態影響が大きいことが示唆され、浸透移行性殺虫剤間にも生態影響の程度に差があることが示された。さらに、農薬の影響は特にトンボ類動態に対して顕著に現れることが示唆された。

#### (2) 環境政策への貢献

##### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

##### <行政が活用することが見込まれる成果>

- 1) 環境省・水産動植物の被害防止に係る農薬登録保留基準の設定において、感受性の種間差、種のライフサイクルと暴露影響の関係、土壌を介した暴露等、現行システムでカバーできないリスクを評価するために、2015年度より水産動植物登録保留基準の運用・高度化検討会が開設されており、本事業の成果がリスク評価の高度化の検討にあたり、科学的知見として活用される。
- 2) 地方自治体においても、農薬による生物多様性影響評価を推進するにあたり、本事業で開発されたメソコズム試験や野外調査手法・解析手法が活用される。

## 6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文(査読あり)>

- 1) 五箇公一、早坂大亮：環境毒性学会誌 (Jpn. J. Environ. Toxicol.) 16: 21-28 (2013)

「農薬の生態リスク評価は生物多様性を守れるか? ~高次リスク評価法としてのメソコズム試験を通して~」

- 2) Kasai A, Hayashi T I, Ohnishi H, Suzuki K, Hayasaka D and Goka K: Scientific Reports. DOI: 10.1038/srep23055 (2016)

「Fipronil application on rice paddy fields reduces densities of common skimmer and scarlet skimmer」

#### <その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 五箇公一、早坂大亮：環境毒性学会誌 16, 2, 21-28 (2013)

「農薬の生態リスク評価は生物多様性を守れるか? ~高次リスク評価法としてのメソコズム試験を通して~」

- 2) 早坂大亮、永井孝志、五箇公一：日本生態学会誌、63, 193-206 (2013)

「農薬による生物多様性影響評価の重要性：個体評価から群集評価へ -生物多様性に配慮した農薬管理の在り方-」

- 3) Sanchez-Bayo F, Tennekes H A and Goka K: In: Insecticides - Development of Safer and More Effective Technologies (Edited by Stanislav Trdan, ISBN 978-953-51-0958-7, 558 pages, Publisher: InTech) (2013)

「Impact of Systemic Insecticides on Organisms and Ecosystems」

- 4) 五箇公一：昆虫と自然 2014年10月号 (2014)

「近年問題視されているネオニコチノイド系殺虫剤の生態影響評価の課題」

- 5) 五箇公一：科学、岩波書店、85, 11, 1035-1038 (2015)

「科学通信 近年問題視されているネオニコチノイド系殺虫剤の生態影響評価の現状と課題」

### (2) 口頭発表(学会等)

- 1) 笠井 敦、林 岳彦、早坂大亮、五箇公一：第61回日本生態学会大会 (2014)

「ネオニコチノイド系農薬が水田の節足動物におよぼす影響」

- 2) 笠井 敦、林 岳彦、永井孝志、早坂大亮、五箇公一：第58回日本応用動物昆虫学会大会 (2014)

「ネオニコチノイド系及びフィプロニル育苗箱処理剤が水田生物群集に及ぼす影響」

- 3) 笠井 敦、林 岳彦、早坂大亮、五箇公一：第20回日本環境毒性学会研究発表会（2014）  
「水田メソコズム試験による農薬の生態影響評価（企画シンポジウム『生態学視点でのリスク評価の今後－生物多様性を考えた環境毒性評価を発展させるために－』）」
- 4) 林 岳彦、笠井 敦、Boulangé Julien、渡邊裕純、日鷹一雅、五箇公一：第20回日本環境毒性学会研究発表会（2014）  
「農薬による水田生物多様性影響の総合的評価手法の開発：今までの1年半で何が分かったか」
- 5) 笠井 敦：第30回個体群生態学会大会（2014）  
「Two serious problems in agroecosystems; invasive alien species and chemical pesticides（企画シンポジウム『バラエティに富んだ食卓を守るために～農業をめぐる送粉者と害虫防除の個体群生態学～』）」
- 6) 五箇公一：東洋大学生命環境科学研究センター開設記念シンポジウム（2014）  
「化学物質がもたらす生物多様性異変」（招待講演）
- 7) 笠井 敦、林 岳彦、早坂大亮、五箇公一：第59回日本応用動物昆虫学会大会（2015）  
「ネオニコチノイド及びフィプロニルの複数年施用が水田節足動物に及ぼす影響」
- 8) 笠井 敦・林 岳彦・早坂大亮・五箇公一：第62回日本生態学会大会（2015）  
「ネオニコチノイド系農薬の複数年施用が水田の節足動物におよぼす影響」
- 9) 五箇公一：日本自然保護協会シンポジウム「ネオニコチノイド系農薬の生態系影響」（2015）  
「ネオニコチノイド系農薬の生態リスク評価および実態」
- 10) 五箇公一：福井県「有機・生き物 米づくり推進大会」（2015）  
「水田の生物多様性とネオニコチノイド農薬」
- 11) 五箇公一：登米市「環境保全型農業セミナーin登米」（2016）  
「水田の生物多様性とこれからの環境保全型農業のあり方について」
- 12) 五箇公一：日本農薬学会第41回大会シンポジウム3「農薬の生態リスク評価の最近の動向－室内試験と野外での影響を繋ぐために」（2016）  
「メソコズム試験の最前線」
- 13) 五箇公一：第63回日本生態学会大会企画集会「ネオニコチノイド農薬による生態影響～何が、どこまで分かったのか？」（2016）  
「ネオニコチノイド農薬規制の今後」
- 14) 笠井 敦・林 岳彦・大西一志・鈴木一隆・杉田典正・早坂大亮・五箇公一：第60回日本応用動物昆虫学会大会（2016）  
「フィプロニルの箱苗施用がトンボ相に及ぼす影響」

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

#### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 国立環境研究所夏の大公開（2013年7月20日、参加者約4,000名）にてメソコズム試験成果紹介
- 2) 一般公開シンポジウム「ネオニコチノイド系農薬と生物多様性～何がどこまで分かっているか？ 今後の課題は何か？」（主催：国立環境研究所、2015年7月15日、国立環境研究所大山ホール、観客約200名）にて講演
  - 13:30-13:35 開会挨拶 国立環境研究所 理事長 住 明正
  - 13:35-14:05 「ネオニコチノイド系農薬の基礎知識」 永井孝志（農業環境技術研究所）
  - 14:05-14:35 「ネオニコチノイド系農薬等のハナバチ類への影響」 中村 純（玉川大学）
  - 14:35-15:05 「ネオニコチノイド系農薬の生態リスク評価」 五箇公一（国立環境研究所）
  - 15:05-15:35 「水田におけるネオニコチノイド系農薬影響実態」 日鷹一雅（愛媛大学）
  - 15:55-16:55 パネルディスカッション コーディネーター 林 岳彦（国立環境研究所）
- 3) 国立環境研究所夏の大公開（2015年7月18日、参加者約4,000名）にてメソコズム試験成果紹介
- 4) 一般公開シンポジウム「ネオニコチノイド系農薬の生態系影響」（主催：日本自然保護協会、2015年11月21日、東京大学弥生講堂一条ホール、観客約200名）にて講演
  - 「ネオニコチノイド系農薬の生態リスク評価及び実態」 五箇 公一（国立環境研究所）

#### (5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 2013年4月24日 朝日新聞（夕刊）記事「農薬選び 赤トンボ救え」
- 2) 2013年8月14日 日本農業新聞 記事「生態系壊さぬ農薬散布へ ミニ水田で影響調査」  
五箇公一のコメント
- 3) 2013年8月30日 日本農業新聞 論説記事「農薬と環境 豊かな水田に科学の目」  
本推進費事業の紹介および、五箇公一のコメント
- 4) 2016年3月16日 産経新聞 記事「農薬がトンボに悪影響 国立環境研、水田で実験」  
本推進費事業の成果（Scientific Reports）の紹介および五箇公一のコメント
- 5) 2016年3月17日 読売新聞 記事「新型農薬 トンボ減らす？」  
本推進費事業の成果（Scientific Reports）の紹介および五箇公一のコメント
- 6) 2016年3月17日 朝日新聞 記事「稲作用農薬 トンボ幼虫減った」  
本推進費事業の成果（Scientific Reports）の紹介および五箇公一のコメント
- 7) 2016年3月17日 日本農業新聞 記事「農薬がトンボに影響」  
本推進費事業の成果（Scientific Reports）の紹介および五箇公一のコメント
- 8) 2016年3月17日 朝日新聞 記事「水田実験で生息数に差」  
本推進費事業の成果（Scientific Reports）の紹介および五箇公一のコメント
- 9) 2016年3月16日 朝日デジタル 記事「水田の農薬、トンボに悪影響 国立環境研実験」  
本推進費事業の成果（Scientific Reports）の紹介
- 10) 2016年3月17日 東奥日報 記事「農薬、トンボに悪影響」  
本推進費事業の成果（Scientific Reports）の紹介および五箇公一のコメント
- 11) 2016年3月17日 新潟日報 記事「農薬、トンボに悪影響 殺虫剤フィプロニル 国立環境

研水田で実験」

本推進費事業の成果 (Scientific Reports) の紹介および五箇公一のコメント

12) 2016年3月18日 上毛新聞 コラム「三山春秋」

本推進費事業の成果 (Scientific Reports) の紹介および五箇公一のコメント

13) 2016年3月19日 中国新聞 記事「稲の農薬トンボに悪影響」

本推進費事業の成果 (Scientific Reports) の紹介および五箇公一のコメント

14) 2016年3月22日 日本経済新聞 記事「農薬がトンボに悪影響 国立環境研、水田で実験」

本推進費事業の成果 (Scientific Reports) の紹介および五箇公一のコメント

## (6) その他

五箇公一：日本農業新聞コラム「万象点描」連載、2014年7月～

本推進費事業内容・成果についてコメント

## 8. 引用文献

- 1) Woin P (1998) Short- and long-term effects of the pyrethroid insecticide fenvalerate on an invertebrate pond community. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 41:137-156
- 2) Sánchez-Bayo F, Yamashita H, Osaka R, Yoneda M, Goka K (2007) Ecological effects of imidacloprid on arthropod communities in and around a vegetable crop. *Journal of Environmental Science and Health B*, 42:279-286
- 3) Brock TCM, Roessink L, Belgers JDM, Bransen F, Maund SJ (2009) Impact of a benzoyl urea insecticides on aquatic macroinvertebrates in ditch mesocosms with and without non-sprayed sections. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 28:2191-2205
- 4) Sonoda S, Izumi Y, Kohara Y, Koshiyama Y, Yoshida H (2011) Effects of pesticides on insect biodiversity in peach orchards. *Applied Entomology and Zoology*, 46:335-342
- 5) Millennium Ecosystem Assessment (2005) Ecosystems and human well-being: biodiversity synthesis. World Resources Institute, Washington
- 6) Intergovernmental science-policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (2012) <http://www.ipbes.net>
- 7) 上田哲行、神宮字寛 (2013) アキアカネに何が起こったのか：育苗箱施用浸透性殺虫剤のインパクト. *TOMBO, Fukui*, 55: 1-12.
- 8) 神宮字寛、上田哲行、五箇公一、日鷹一雅、松良俊明 (2009) フィプロニルとイミダクロプリドを成分とする育苗箱施用殺虫剤がアキアカネの幼虫と羽化に及ぼす影響. *農業農村工学会論文集* 259: 35-41.

## (2) 農薬の環境中移行動態の予測モデルの構築と検証

東京農工大学大学院農学府 国際環境農学部門 渡邊裕純

<研究協力者>

東京農工大学大学院農学府 産官学連携研究員 ブランジェ・ジュリアン・エリック・スタニスラス

平成25(開始年度)～27年度累計予算額：21,728千円（うち平成27年度：7,028千円）

予算額は、間接経費を含む。

### [要旨]

本研究では、土壌処理された箱施用殺虫剤の水田環境中での動態を数理モデル化し、田面水中および水田土壌環境中での殺虫剤濃度の予測を可能とする数理モデルの構築を目的とした。

平成25年度は箱施用殺虫剤とその代謝物の水田環境中動態プロセスの数理モデル化を行った。モデルは、既発表された水田農薬動態予測モデルのPCPF-1を基に開発された。新規開発モデル(PCPF-NB)は、既発表論文の箱施用殺虫剤、イミダクロプリドとフィプロニルの実測データを用いて検証した。

平成26年度は、前年度開発された水田農薬動態予測モデルPCPF-NBと畑土壌農薬動態モデルSPECを連結し、水田環境の湛水条件、稲刈取り後の非湛水条件に対応した通年シミュレーションモデルを新規に開発した。次に得られた環境条件および農薬動態入力データを用い、フィプロニル、クロチアニジン、クロラントラニリプロールの国環研水田メソコズムシナリオによる農薬動態シミュレーションを行った。

平成27年度は、モデルの予測精度を改善し、湛水-非湛水統合農薬動態モデルの構築を完了した。モデルの検証・評価として、サブテーマ1の国環研水田メソコズム調査から得られた実測濃度データを用いた通年シミュレーション、試験圃場シナリオによる箱施用殺虫剤の通年シミュレーション、サブテーマ3の調査から得られた実測濃度データを用いた実圃場シナリオでの通年シミュレーションをそれぞれ行った。

本研究で開発されたモデルは、水管理や農薬処理条件を適性条件として制御した実験圃場における農薬動態モニタリングの結果においては、箱施用殺虫剤の水田環境中の動態を高い精度で予測することが可能となった。

### [キーワード]

農薬動態、予測モデル、箱施用殺虫剤、通年シミュレーション、残留農薬評価

## 1. はじめに

現在のOECD試験ガイドラインに準じた農薬の生態影響評価においては、種ごとの薬剤感受性の変異や複雑な生態系システムを介した生物多様性に対する影響の評価法としては明白な限界があ

る。また、農薬も薬剤ごとに物理化学性状が異なるため水田環境中での分解・挙動・残留の動態は一様ではなく、同じ薬剤使用量であっても微小生息地（水中・土表面・土中等）の違いにより各生物種への実質的な曝露量は大幅に異なりうる。そのため、農薬による生物多様性への影響を評価する際には、本来、地域ごとの生態系を構成する種の感受性変異や群集内での種間関係を介した影響を考慮するとともに、薬剤の水田環境中での動態に依存した各生物種への実質的な曝露量の時空間的な変異も考慮する必要がある。

一方、育苗箱施用の農薬が日本をはじめアジアで急速に利用されるようになった。水稲用農薬の全面散布の代替方法としての育苗箱施用は、農薬施用率を引き下げるだけでなく、より安全に薬剤を取り扱うことを可能とした。日本では、箱苗施用殺虫剤は1970年代以来稲作に使用されてきた<sup>1)</sup>。箱苗施用殺虫剤は移植前施用（before transplanting BT）と播種時施用（at rice sowing AS）に分けられる。BT施用では、移植前に顆粒剤を苗に直にまく一方で、AT施用では移植の約14日前に粒剤を土に混ぜ込むか、播種時に散布し、土を被覆する<sup>2),3)</sup>。近年、水田型環境（水田圃場と小型ライシメーター）におけるBT処理とAS処理により施用された農薬の動態について報告されている<sup>2),4),5),6)</sup>。またこれらの箱苗施用殺虫剤は、いくつかの日本の河川水中で検出されており、水域環境への悪影響が懸念されている。水環境における農薬の環境影響評価には、農薬動態の予測が不可欠である。水田環境における農薬動態予測モデルはこれまで開発されて来た<sup>7),8),9)</sup>。しかし、水田環境における箱苗施用殺虫剤の動態をシミュレーションに利用できるモデルの開発が必要である。また、薬剤の長期的残留予測もしくは評価を行う場合、水田環境では土壌水理条件が湛水、非湛水と作付ごとに劇的に変化し、その環境変化に伴う薬剤の動態プロセスをモデル化する必要がある。そこで本研究では、箱苗施用殺虫剤を対象とした水田環境中移行動態の予測モデルの構築とその検証・評価を行う。

## 2. 研究開発目的

本業務は、土壌処理された箱苗施用殺虫剤の水田環境中での動態を数理モデル化し、田面水中および水田土壌環境中での殺虫剤濃度の予測を可能とするシミュレーションモデルの構築を目的とした。

平成25年度の研究目的は、土壌処理された箱苗施用農薬の水田環境中の動態予測モデルの構築を行うために、湛水時および非湛水時における箱苗施用殺虫剤とその代謝物の水田環境中動態プロセスの数理モデル化を行うことであった。

平成26年度の研究目的は、薬剤の残留性・蓄積性の長期残留予測をめざし、前年度に開発した湛水および非湛水モデルを統合し水田の農薬移行動態の通年シミュレーションモデルを構築すること、さらに室内試験および野外試験結果を用い、供試農薬の水田環境中動態の通年動態シミュレーションを行うことであった。

平成27年度の研究目的は、サブテーマ1・3の調査から得られた実測濃度データを用いて通年シミュレーションモデルの検証および改良を行い、農薬の施用シナリオごとの水田中薬剤濃度動態について環境中動態モデルによる予測を行うことであった。

### 3. 研究開発方法

#### 【平成25年度業務】

#### (1) 箱施用殺虫剤とその代謝物の水田環境中動態プロセスを数理モデル化および構築

##### 1) 湛水条件下での箱施用農薬の田面水および水田土壌中動態の予測数理モデルの構築・検証

構築されたモデルは、既発表された水田農薬動態予測モデル、PCPF-1<sup>8),9),10)</sup>を基に開発された。新規開発モデルは、規発表論文の箱苗施用薬剤、イミダクロプリドとフィプロニルの実測データを用いて検証した。<sup>11)</sup>

##### 2) 刈取り後の非湛水条件下での長期残留予測モデルの構築

土壌コンパートメントでの農薬動態の数式式の構築・プログラミングを行う。モデル構築手法は上記PCPF-1モデルに準じ、水移動および物質収支を考慮した。

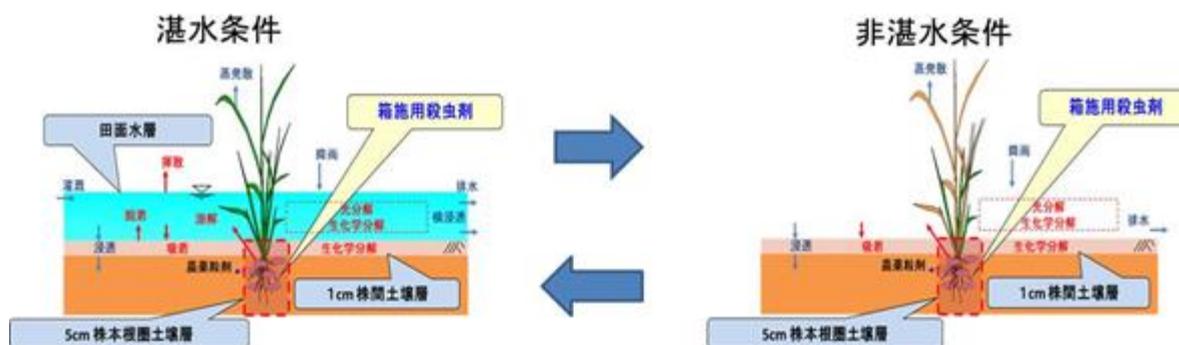
##### 3) 土壌吸着、光分解、生化学分解等に関するパラメータ設定のための室内試験

箱施用殺虫剤フィプロニルとイミダクロプリドの水田田面水中での分解パラメータ、分配係数は既発表のデータを用い両薬剤の水田環境中の主要な動態パラメータとして設定された。また、水田土壌中での分解のパラメータは室内試験により定量され、パラメータとして設定された。

#### 【平成26年度業務】

#### (1) 代謝物を含む農薬動態の通年シミュレーションモデル開発：

前年度開発した湛水条件下での農薬動態予測モデルと現在開発中の非湛水条件下での農薬動態予測モデルを結合し、農薬動態の周年シミュレーションを可能とする湛水-非湛水統合農薬動態モデル(図(2)-1)を開発した。開発した新規モデルは、既発表論文の水収支シナリオおよび農薬実測データを用い、パラメータの調整およびモデル予測の評価を行った。



図(2)-1. 湛水-非湛水統合農薬動態モデル概念図

## (2) 国環研水田メソコズムシナリオの構築

国立環境研究所の水田メソコズムでモニタリングされた残留農薬の継時的変化を農薬動態モデルにより再現するためのシナリオの構築を行った。薬剤の物理化学パラメータは文献値および実験値（室内試験等）より設定し、水田水収支、非耕作期の水分状態を実測データから定量した。

## (3) モデル入力値設定のための室内試験

非湛水条件（不飽和条件）の水田土壌中での農薬分解速度を定量する室内試験を行った。供試農薬はフィプロニルおよびイミダクロプリドで行い、試験方法は、前年度の水田土壌中の農薬分解試験に準じて行った。本試験では、温度設定を20℃と5℃の条件下で行い、冬季の薬剤の分解速度の温度変化に対応するようにした。

## (4) 農薬動態モデルによる農薬残留動態のシミュレーション

ここでは、上記で得られた環境条件および農薬動態モデル入力値を用い、供試箱施用農薬、フィプロニル、クロチアニジン、クロラントラニリプロールの国環研水田メソコズムシナリオによる農薬残留の動態シミュレーションを行った。

### 【平成27年度業務】

#### (1) サブテーマ1の国環研水田メソコズム調査から得られた実測濃度データを用いた通年シミュレーションモデルの検証：

平成27年度では、平成25-26年の2年間の水田メソコズムにおける通年シミュレーションを実行し、水収支シナリオおよび農薬実測データを用い、パラメータの調整およびモデル予測の評価を行った。

#### (2) 試験圃場シナリオによるイミダクロプリドおよびクロチアニジンの通年シミュレーションの検証

試験圃場シナリオによる通年シミュレーションの検証を行うために、東京農工大学での圃場試験の結果を用い、イミダクロプリドおよびクロチアニジンにおける通年シミュレーションを実施し、その評価及び検証を行った。薬剤の物理化学パラメータは文献値および実験値（室内試験等）より設定し、水田水収支は実測データから定量した。

#### (3) サブテーマ3の調査から得られた実測濃度データを用いた実圃場シナリオでの通年シミュレーション

サブテーマ3における実圃場での農薬濃度調査データを用い、実圃場シナリオでの通年シミュレーションを行った。2013-2014年の2年間の調査より、箱苗移植日（農薬散布日）および農薬濃度調査日は圃場調査スケジュールに従い、それに伴う気候データは現地アメダスデータを用い、降雨シナリオ、FA0-56法<sup>12)</sup>による蒸発散シナリオを構築した。構築した現地実圃場シナリオを用い、3薬剤、イミダクロプリド、クロラントラニリプロール、クロチアニジンを対象に平成25-26年の2年間の水田メソコズムにおける通年シミュレーションを実行し、農薬実測データを用い、モ

デル予測の評価を行った。

#### （４）実圃場シナリオにおける長期シミュレーションおよび汚染水灌漑シナリオにおける農薬残留評価

上記で得られた現地実圃場シナリオと2013-2014年の2年間の気象シナリオを用い、イミダクロプリド、クロラントリニリプロール、クロチアニジンを対象に10年間の長期通年シミュレーションを実行し、モデル予測の評価を行った。また、圃場整備済の水田群等では、循環灌漑をおこなうため、水田排水により汚染された灌漑水と共に非施用区に農薬が流入することが考えられる。現地実圃場調査での農薬非施用区での残留農薬検出に関してモデルシナリオを構築し、農薬非施用区での汚染灌漑水の流入による影響を試みた。

### 4. 結果及び考察

#### 【平成25年度業務】

#### （１）箱施用殺虫剤とその代謝物の水田環境中動態プロセスを数理モデル化および構築

##### 1) 湛水条件下での箱施用農薬の田面水および水田土壌中動態の予測数理モデルの構築・検証

###### a. モデル構築

PCPF-1 における根圏モデルでは水田は、田面水、水田土壌、土壌根圏の3つの区分に分けられる。田面水および水田土壌に関する仮定は、元となる PCPF-1 モデルと同一である。田面水コンパートメントは水深が可変で完全混合のコンパートメントと仮定される。水田土壌コンパートメントもまた完全に混合であると仮定され、深さはシミュレーションの始めはゼロであるが、浸透とともに最大深度である 1.0 cm まで増加する<sup>9)</sup>。根圏部は同様に完全混合のコンパートメントとして定義され、根圏の体積はユーザーが根圏の深さ (cm) と圃場面積に対する割合 (%) の二つを入力することで決定される。モデルの調整、改良、感度解析については、東京農工大学の圃場試験およびライシメータ試験で得られた既発表論文データおよび室内試験のデータを用いた。飽和水田土壌中での分解試験の結果より、水田土壌中半減期をイミダクロプリドとフィプロニルでそれぞれ 19.4 日と 23.8 日と設定し、その他パラメータは、文献値、気発表実験データから得られた値をデフォルト値として使用した。

また、溶解速度定数、溶出速度定数、農薬飛散（ドリフト）係数はモデル調整（キャリブレーション）による設定を行った。表(2)-1 に移植前（BT）処理シナリオと播種時（AS）シナリオにおけるイミダクロプリドとフィプロニルのモデル入力パラメータ値を示す。

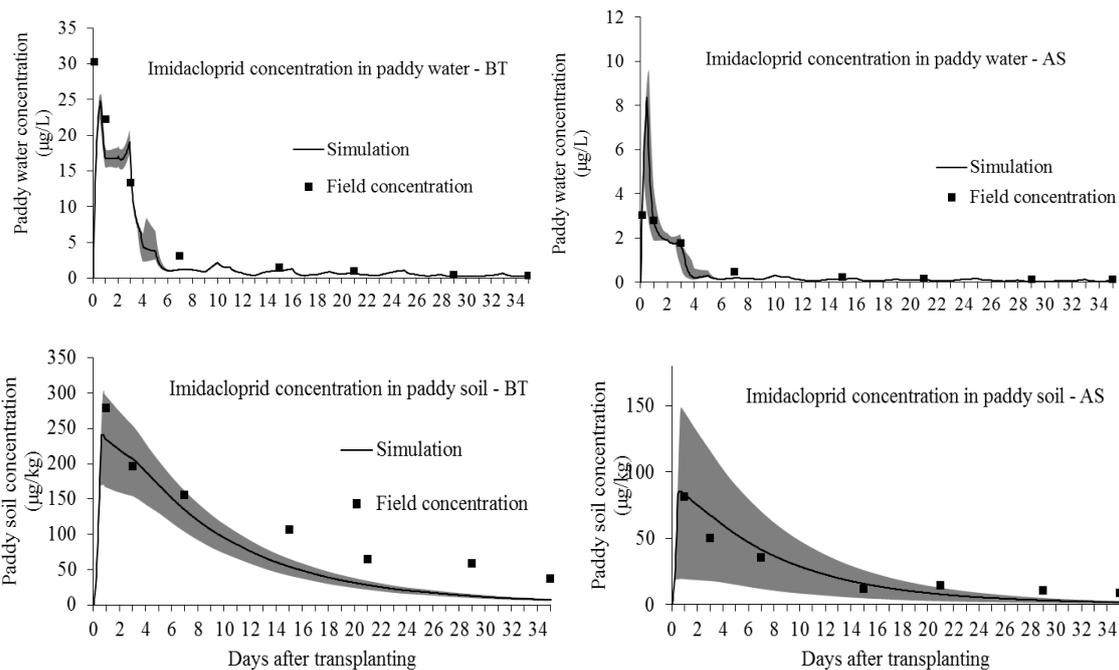
###### b. モデルの検証作業

検証作業の対象農薬は箱施用殺虫剤イミダクロプリドおよびフィプロニルである。イミダクロプリドとフィプロニルの田面水中濃度予測値と実測値および土壌中濃度予測値と実測値をそれぞれ図(2)-2と図(2)-3に示した。

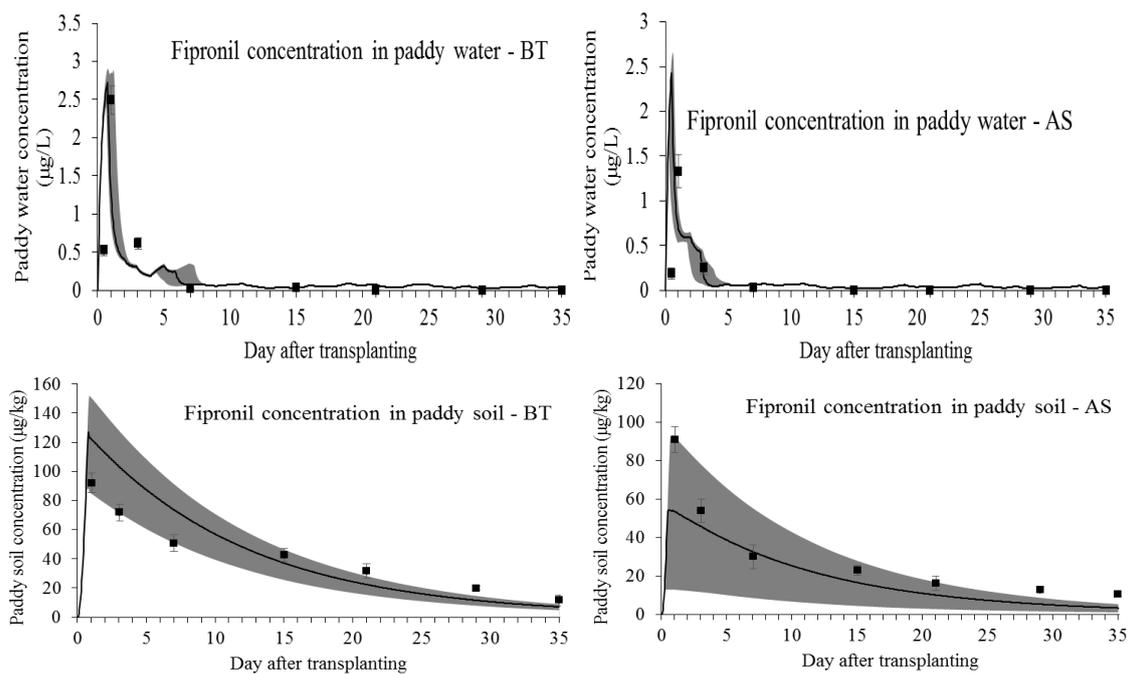
表(2)-1 移植前 (BT) 処理シナリオと播種時 (AS) シナリオにおけるイミダクロプリドとフィプロニルのモデル入力パラメータ値

PCPF-1 Root Zone inputs	Units	Imidacloprid		Fipronil	
		BT	AS	BT	AS
General information					
Application rate	g/m <sup>2</sup>	0.02	0.0195	0.01	0.01
Paddy water					
Solubility	mg/L	514 <sup>a</sup>	514 <sup>a</sup>	3.78 <sup>b</sup>	3.78 <sup>b</sup>
1st order dissolution rate cte	1/day	5.0E-5 <sup>c</sup>	5.0E-5 <sup>c</sup>	0.0008 <sup>c</sup>	0.0008 <sup>c</sup>
1st order desorption rate cte (phase 1)	1/day	0.1 <sup>c</sup>	0.01 <sup>c</sup>	0.025 <sup>c</sup>	0.006 <sup>c</sup>
1st order desorption rate cte (phase 2)	1/day	0.01 <sup>c</sup>	0.001 <sup>c</sup>	0.001 <sup>c</sup>	0.001 <sup>c</sup>
1 <sup>st</sup> order photolysis rate cte	m <sup>2</sup> /kJUVB	0.087	0.087	0.0864	0.0864
Biochemical degradation HL (phase 1)	day	113.3 <sup>g</sup>	113.3 <sup>g</sup>	54 <sup>h</sup>	54 <sup>h</sup>
Biochemical degradation HL (phase 1)	day	113.3 <sup>g</sup>	113.3 <sup>g</sup>	54 <sup>h</sup>	54 <sup>h</sup>
Paddy soil					
Biochemical degradation HL (phase 1)	day	12.7	11	13.5 <sup>i</sup>	13.5 <sup>i</sup>
Biochemical degradation HL (phase 2)	day	12.7	11	13.5 <sup>i</sup>	13.5 <sup>i</sup>
Equilibrium partitioning coefficient	L/kg	12.2 <sup>f</sup>	12.2 <sup>f</sup>	35 <sup>d</sup>	35 <sup>d</sup>
Root Zone					
Depth	cm	5	5	5	5
Root zone area	%	5	5	5	5
Pesticide drift	%	14 <sup>c</sup>	6 <sup>c</sup>	14 <sup>c</sup>	6 <sup>c</sup>
1 <sup>st</sup> order Desorption rate cte (phase 1)	1/day	0.1 <sup>c</sup>	0.01 <sup>c</sup>	0.025 <sup>c</sup>	0.006 <sup>c</sup>
1 <sup>st</sup> order Desorption rate cte (phase 2)	1/day	0.01 <sup>c</sup>	0.001 <sup>c</sup>	0.001 <sup>c</sup>	0.001 <sup>c</sup>
Degradation half-life in root zone (phase 1)	day	12.7	11	26.4 <sup>d</sup>	19.2 <sup>d</sup>
Degradation half-life in root zone (phase 2)	day	12.7	11	26.4 <sup>d</sup>	19.2 <sup>d</sup>

Note: a-g refer to Boulange et al., (2015)<sup>11)</sup>



図(2)-2. 田面水中（上）と土壌中のイミダクロプリド濃度の実測値および予測値



図(2)-3. 田面水中（上）と土壌中（下）のフィプロニル濃度の実測値および予測値

田面水および水田土壌における両薬剤の計算値は、それぞれの実測値をよい精度で再現することができた。予測値/実測値の $R^2$ の値域が0.85から0.97の間であることから、ASとBTの両処理区のイミダクロプリドおよびフィプロニルの実測値に対してシミュレーションの予測結果は正確であった。さらに、ナッシュサトクリフモデル評価係数 $E_{NS}$ についても、予測結果は0.70を超えるものであり、モデル予測の精度は適切だった。したがって、PCPF-1根圏モデルには水田における湛水条件下での箱施用農薬の田面水および水田土壌中の動態予測を精度よく再現することができると考えられた。

## 2) 刈取り後の非湛水条件下での長期残留予測モデルの構築

本研究では、箱施用殺虫剤の長期残留予測モデルの構築を目標に、刈取り後の非湛水条件下での農薬動態シミュレーションを行うモデルを開発した。農薬の長期残留予測は、湛水条件下の水田農薬動態予測モデルと非湛水条件下の畑土壌農薬動態モデルを結合し、一薬剤に関して周年のシミュレーションを行うことにより実行する。ここでは、開発中の畑土壌中農薬動態モデルSPECを改良し、非湛水条件下での農薬動態モデルを構築した。

## 3) 土壌吸着、光分解、生化学分解等に関するパラメータ設定のための室内試験

水田土壌中のイミダクロプリドとフィプロニルの濃度は、初期濃度より指数関数的に減少し、それぞれの水田土壌中半減期はそれぞれ19.4日と23.8日であった。その他主要モデルパラメータは表(2)-1の通り設定された。

### 【平成26年度業務】

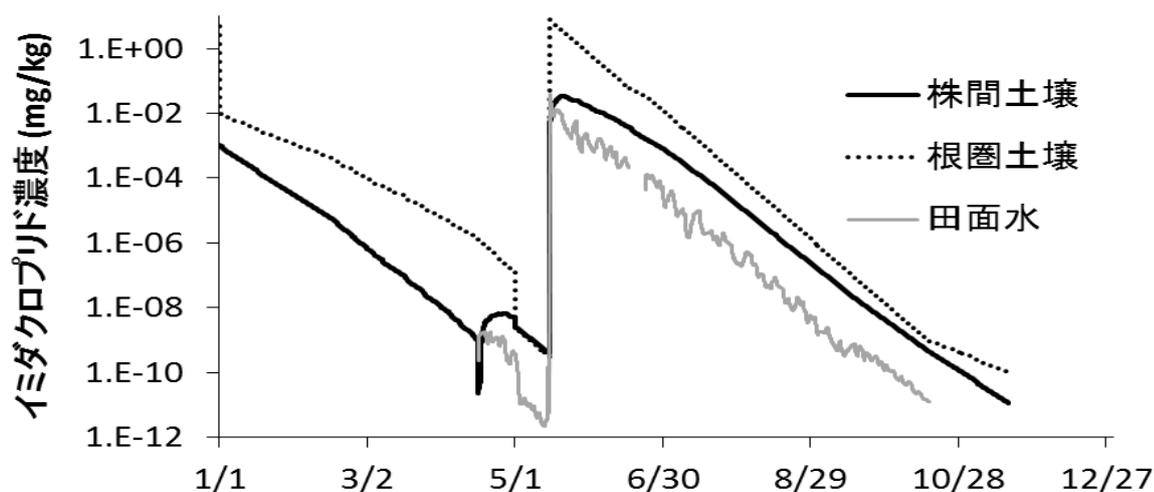
#### (1) 代謝物を含む農薬動態の通年シミュレーションモデル開発

湛水条件下についてのモデルは、除草剤等の本田施用シナリオに関して開発されてきた水田農薬動態予測モデルPCPF-1<sup>8), 9), 10)</sup>を基に開発を進め、箱施用剤の水田環境中の動態を、田面水、水田土壌、土壌根圏の3つコンパートメントに分け、それぞれのコンパートメント間での水および農薬の物質収支を考慮し、農薬濃度の計算を行うPCPF-NBモデルを開発した。一方、刈取り後の非湛水条件下では、開発中の畑土壌中農薬動態モデルSPEC<sup>13)</sup>の改良により行った。モデルの基本的構造は、PCPF-1と同様のコンパートメントモデルで、層ごとの水収支と農薬物質収支を解く方式をとった。表層1cm土壌では農薬の吸着、分解、移動のプロセスが行われる農薬処理層とし、それ以下の層を農薬の吸着、土壌中分解、浸透のプロセスが行われる農薬浸透層とし、農薬浸透層の厚や数はユーザー設定により決められる。

モデルの調整および評価に使用する標準シナリオには東京農工大圃場での既発表モニタリング試験<sup>2), 3)</sup>の水収支データを用いた。このモデルシミュレーションでの供試農薬は、イミダクロプリド、フィプロニル、クロチアニジン、クロラントラニリプロールの4剤とする。ここではシミュレーションの開始を1月1日とし、非湛水条件下での株間土壌と根圏土壌のそれぞれの薬剤の初期農薬濃度を、土壌中最高濃度および土壌中分解半減期を基に推定し、入力した。4月15日に湛水を開始し、5月1日に代かき、5月15日に田植えに伴う農薬処理が行われた。田植えから1か月後の6月15日から

1週間を中干し期間と設定し、非湛水条件でのシミュレーションを行った。その後湛水条件の期間は10月15日まで継続され、それ以後は再度非湛水条件でシミュレーションが継続された。

図(2)-4にイミダクロプリドを例として、水田環境中の農薬動態通年シミュレーションの結果を示す。湛水条件下では、フィプロニルおよびイミダクロプリドの濃度は精度よく再現された<sup>11)</sup>。非湛水条件を加え通年シミュレーションを行うことにより、根圏に処理された箱施用農薬が、水田の作業と共に株間表層土壌と田面水との混和や平衡状態を経て複雑に移行・残留することが示唆された。



図(2)-4. イミダクロプリドの水田環境中通年シミュレーション

## (2) 国環研水田メソコズムシナリオの構築

国立環境研究所の水田メソコズムでモニタリングされた残留農薬の経時的変化を農薬動態モデルにより再現するためのシナリオ構築を行った。水田における通年の圃場管理は、春の耕起による土壌表層の均一化、灌漑による湛水とその後の代かき、農薬施用、中干し、刈取り前の落水による乾田化、そしてその後春までの非湛水土壌条件における管理のように代表される。このような水田圃場管理は水田水収支、浸透などの土壌の水理特性に大きく影響を与える。そこで、基本的な通年圃場作業の基本シナリオを構築し、メソコズム水田での湛水・非湛水条件での通年シミュレーションのシナリオとした。水収支シナリオとして、平均田面水深、日灌漑水量、日排水量、日降雨量、日蒸発散量を実測値と推定値により設定した。次に本水田メソコズム試験に使用された供試農薬フィプロニル、クロチアニジン、クロラントラニリプロールの主要農薬動態パラメータを実測値および文献値を基に設定した。

## (3) パラメータ設定のための室内試験

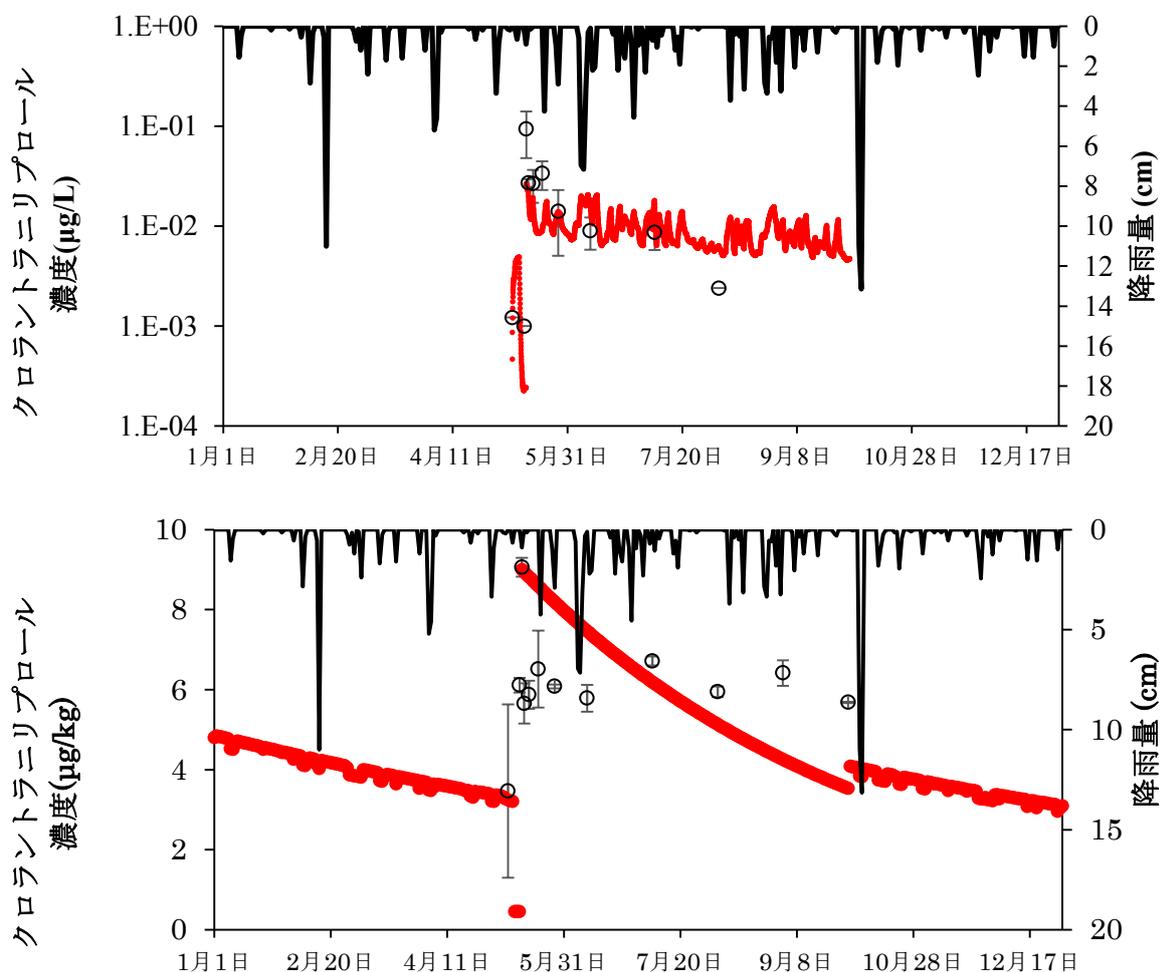
温度条件20°Cにおけるイミダクロプリドおよびフィプロニルの土壌中分解半減期は平均それぞれ

れ13.2日、および16.4日であった。一方5°Cにおけるイミダクロプリドおよびフィプロニルの土壌中分解半減期は平均それぞれ15.3日、および17.7日で、20°Cの条件よりも多少長いが何れも統計的な有意差はなかった。しかし、平成25年度に行った飽和条件での結果と比較すると、不飽和条件での何れの薬剤の土壌中分解半減期が短いという結果となり、更なる考察、検証、確定が必要である。

#### (4) 農薬動態モデルによる薬剤残留動態シミュレーション

ここでは、上記で得られた環境条件および農薬動態パラメータを用い、供試箱施用農薬、フィプロニル、クロチアニジン、クロラントラニプロールの国環研水田メソコズムシナリオによる農薬残留の動態シミュレーションを行った。

図(2)-5にクロラントラニプロールを例として水田環境中動態の通年シミュレーションの結果を示す。上図がクロラントラニプロールの田面水中下図が水田土壌中5cmにおける平均農薬濃度推移を示す。



図(2)-5. 農薬動態の通年シミュレーションにおけるクロラントラニプロールの田面水中(上)および水田土壌中5cm(下)における農薬濃度実測値(○)と予測値(●)の推移

非湛水期では全体的に降雨ごとの上下運動を繰り返しながら、土壌中分解半減期に伴い緩やかに減少する動態が再現された。湛水条件が終了した9月30日以降も同様に農薬濃度は、土壌中分解半減期と降雨イベントに反応して緩やかに減少していった。一方、湛水期間でのクロラントラニリプロールの田面水中予測濃度は、湛水直後および湛水期間中期7月まで精度よく予測された。湛水期後期は多少過大評価となる傾向にあった。しかし土壌中5cmのクロラントラニリプロール濃度は、実測値がほぼ横ばいの傾向を示したのに対し、予測値は半減期が約60日の速度で減衰して行った。クロラントラニリプロールの水田土壌中半減期は228日と比較的長く、有機炭素吸着係数が高いことを考慮すると、予測精度の向上のためには、土壌からの農薬溶出係数の調整が重要となってくる。

供試箱施用農薬、フィプロニル、クロチアニジン、クロラントラニリプロールの国環研水田メソコズムシナリオによる農薬残留の動態シミュレーションを行った。3薬剤とも、湛水期の田面水中の農薬濃度の予測は比較的精度よく行われた。実水田での作業を考慮したシナリオを用いて農薬動態の通年シミュレーションを行うことにより、水田に施用された箱施用殺虫剤の動態メカニズムの考察が可能となった。代かき作業時点での土壌表層の濃度上昇は一見して農薬の土壌中蓄積現象のように見えるが、これは、根圏中の農薬と土壌表層中の農薬の代かき作業による均一化に伴う再分配が行われるために起こる現象である。今回開発したPCPF-NBモデルは箱施用殺虫剤の動態の通年予測に有用なツールとなると示唆された。

#### 【平成27年度業務】

##### (1) サブテーマ1の国環研水田メソコズム調査から得られた実測濃度データを用いた通年シミュレーションモデルの検証：

水田の水環境の通年サイクルは、作付け期間は湛水条件、収穫後の非耕作期間を非湛水条件として次年度の作付け期間へと繰り返される。国立環境研究所メソコズムの2013-2014年通年シミュレーション作業日程を表(2)-2に、調査期間中および非灌漑期の水田メソコズムでの水収支を表(2)-3に示す。これらのデータをメソコズムの2013-2014年通年シミュレーションの入力シナリオとした。

表(2)-2. 国立環境研究所メソコズムの2013-2014年通年シミュレーション作業日程

作業	日程
シミュレーション開始	2013年1月1日
シミュレーション終了	2014年12月31日
湛水開始	5月7日/5月7日
代かき	5月10日/5月10日
農薬処理	5月13日/5月14日
湛水終了	9月30日

表 (2)-3. 水田メソコズム水収支シナリオ

日平均水収支	単位	湛水期	非湛水期
平均田面水位	cm	10.5	-
降雨量	cm	0.53	0.41
灌漑量	cm	2.45	0
排水量	cm	2.67	0
浸透量	cm	0	0.026
蒸発散量	cm	0.24	0.075

また、表(2)-4には、国立環境研究所メソコズムの2013-2014年通年シミュレーションに用いたフィプロニル、クロチアニジン、クロラントリニルプロールの主要農薬動態パラメータを示す。これらの入力値は2013年度と2014年度に室内実験およびモデル調整により設定された値を用いた。次に、図(2)-6と(2)-7には国環研水田メソコズムにおけるフィプロニル（上）、クロチアニジン（中）、クロラントリニルプロール（下）の田面水中と水田土壌中のそれぞれの濃度の2013-2014年の通年シミュレーションの予測値と実測値を示す。

表 (2)-4 フィプロニル、クロチアニジン、クロラントリニルプロールの主要農薬動態パラメータ

	単位	フィプロニル	クロチアニジン	クロラントリニルプロール
分子量	g/mol	437.15	249.7	483.15
水溶解度	mg/L	3.78	340	0.88
農薬溶出速度定数(株間土壌)	1/day	0.008	0.01	0.001
(根圏土壌)	1/day	0.006	0.0001	0.005
田面水中生化学分解半減期 <sup>a</sup>	days	12.5/20	50/50	50/50
水田土壌中生化学分解半減期 <sup>a</sup>	days	10/100	121/121	50/500
有機炭素吸着係数	L/kg	825	123	328

<sup>a</sup>：半減期は第1フェーズ半減期が12.5日、第2フェーズ半減期が20日の場合を12.5/20で標記した

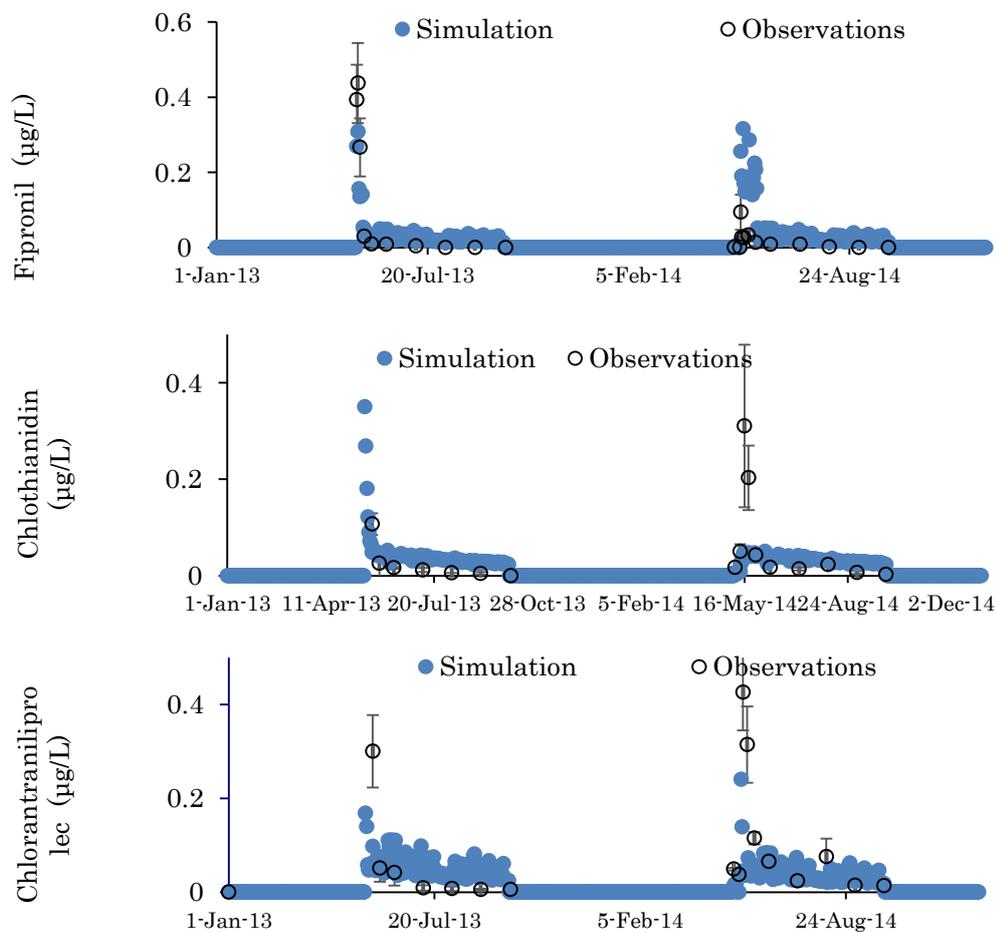


図 (2)-6. 国環研水田メソコズムにおけるフィプロニル (上), クロチアニジン (中), クロラントリニプロール (下) の田面水中濃度の平成 25-26 年通年シミュレーションの予測値 (●) と実測値 (○).

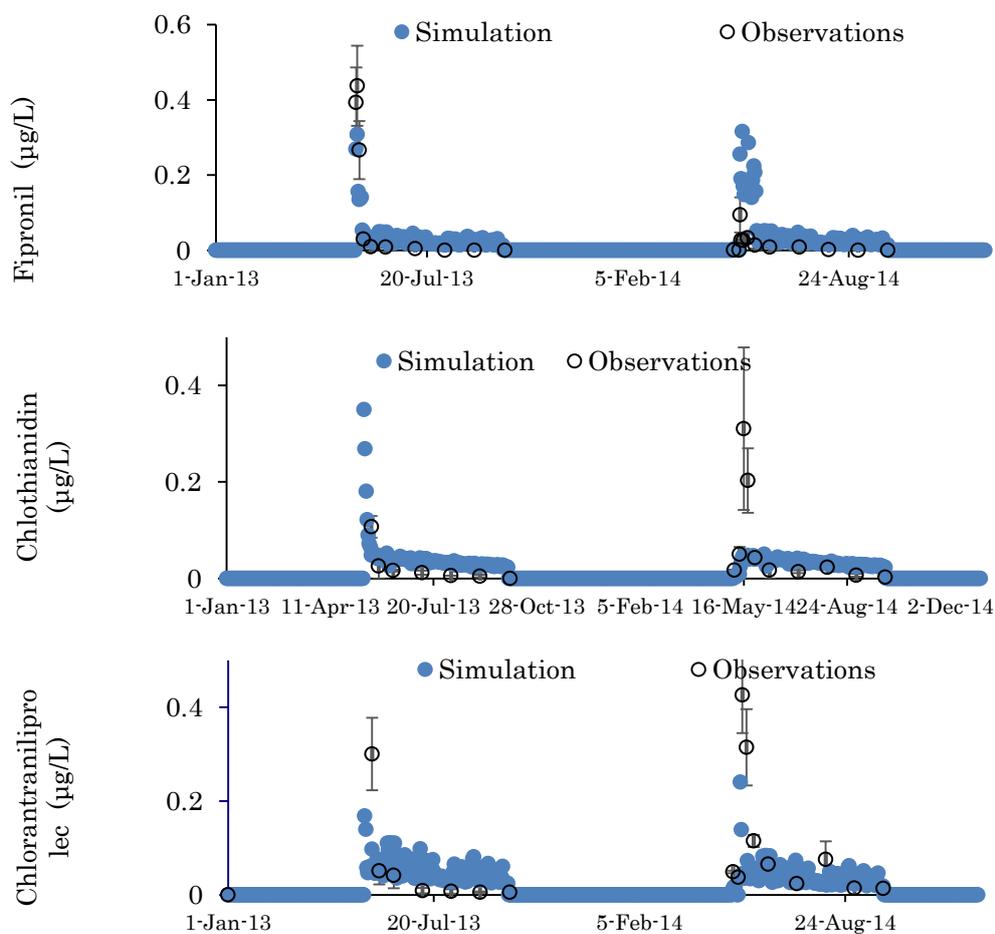


図 (2)-7. 国環研水田メソコズムにおけるフィプロニル (上), クロチアニジン (中), クロラントリニプロール (下) の田面水中濃度の平成 25-26 年通年シミュレーションの予測値 (●) と実測値 (○).

新規に開発されたモデルは、2年間の通年モニタリングの結果を再現することが可能となった。本研究のメソコズムでの試験では、薬剤の移植時のこぼれ落ちが少なく、また薬剤も確実に土壤中に埋設され、田面水中および株間土壌中の濃度は他の圃場<sup>2), 3), 16)</sup>と比較して一桁ほど低い傾向にあった。そのため、それぞれの農薬のこぼれ落ちによる係数や農薬脱着速度定数を調整してシミュレーションの再現性を向上した。以下に薬剤の水田環境中の動態特性傾向を評価する。

### 1) フィプロニルの動態特性傾向の評価

フィプロニルは、田面水においては光分解における半減期が約37時間<sup>17)</sup>と短く、また水溶解度も土壌中からの溶出や田面水中の濁度による光分解への影響を考慮に入れても、田面水中の濃度は低く推移すると考えられる。一方土壌では、水田土壌中半減期は12-26日であり、長期残留特性は低いと考えられる。

## 2) クロチアニジンの動態特性傾向の評価

クロチアニジンは、その物理化学性はイミダクロプリドとよく類似している。イミダクロプリドの田面水中半減期は約2日程<sup>2)</sup>であるが、クロチアニジンの水溶解度はイミダクロプリドと同様に高く、田面水中濃度もイミダクロプリドと同程度に比較的高い<sup>2)</sup>。よって田面水の流出および循環灌漑等で水田集水域内外に移動拡散する可能性は高いと考えられる。土壌中半減期は農薬動態パラメータで比較するとフィプロニルより長く残留性はフィプロニルより高い。

## 3) クロラントリニルプロールの動態特性傾向の評価

クロラントリニルプロールは、他の2薬剤と比較して水溶解度が低いが、田面水中の濃度は水田メソコズムの場合も、下記の実圃場調査の場合も他の薬剤と同等の濃度レベルであった。水田土壌においては、土壌吸着係数はフィプロニルよりも低いが、土壌中の分解半減期は、酸化土壌で597日、畑土壌で204日と報告されており<sup>14)</sup>、水田メソコズム試験データによるモデル入力値の調整の結果でも半減期が228日となっている。このため、水田土壌での長期残留の可能性が3薬剤の中では一番高いと考えられる。しかし土壌浸透などによる土壌からの脱着が顕著の場合はこの限りではないと考えられる。

### (2) 試験圃場シナリオによるクロチアニジンおよびイミダクロプリドの通年シミュレーションの検証

本研究では、未発表の圃場モニタリング試験データを用い、開発された湛水-非湛水統合農薬動態モデルを用い、クロチアニジンおよびイミダクロプリドの水田環境中動態の通年動態シミュレーションの検証を行った。農薬動態モニタリングは、2012年-2013年に東京農工大学附属農場で行われた。東京農工大学の附属農場は、全2.3haの水田群からなり、有機物含有量4%の軽埴土(Light Clay)で、その圃場条件はThuyet et al. (2011a)<sup>2)</sup>で報告されたとおりである。

開発された湛水-非湛水統合農薬動態モデルは、実験圃場スケールでのクロチアニジンおよびイミダクロプリドの水田環境中動態の通年動態を精度よく再現することができた。本圃場試験での経年モニタリングでは、クロチアニジンおよびイミダクロプリドの土壌中残留については、1年目、2年目の薬剤散布前の残留濃度はともに検出限界以下のレベルであった。クロチアニジンおよびイミダクロプリドの田面水中最高濃度は、19ppbと13ppbで、土壌中最高濃度は、56ppbと28ppbであった。

表(2)-5には東京農工大学附属農場での農薬動態モニタリングにおける2013-2014年の通年シミュレーションの予測値と実測値の相関係数、相対二乗誤差、ナッシュ・サトクリフ予測効率係数を示した。両薬剤のモデル予測の統計指標より、開発された湛水-非湛水統合農薬動態モデルによる、クロチアニジンおよびイミダクロプリドの水田環境中動態の通年動態シミュレーションの予測精度は高いと判断された。

表 (2)-5. クロチアニジンとイミダクロプリドのモデル予測値と実測値の統計的相関

	Paddy water			Paddy soil		
	$R^2$	RMSE	$N_{SE}$	$R^2$	RMSE	$N_{SE}$
Clothianidin	0.71	84.98	0.67	0.65	140.63	0.62
Imidacloprid	0.60	158.94	0.26	0.31	494.01	-12.13

### (3) サブテーマ3の調査から得られた実測濃度データを用いた実圃場シナリオでの通年シミュレーション

本研究で使用された、実圃場における2013-2014年度農薬濃度調査データに対応した、作業日程を実圃場シナリオとして入力し、現地の気象データから概算された蒸発散および降雨データより水収支シナリオを構築した。基本的水収支パラメータは、前述の東京農工大学での圃場試験水収支シナリオと同様に、降雨と蒸発散を現地アメダスデータベースより構築した。また、実圃場での2013-2014年通年シミュレーションにおけるフィプロニル、クロチアニジン、クロラントリニルプロールの主要農薬動態パラメータ値は、文献値<sup>14)</sup>、前年度の実験値および入力値調整作業により構築した。

図(2)-8と図(2)-9に実圃場におけるフィプロニル(上)、クロチアニジン(中)、クロラントリニルプロール(下)の田面水中濃度および土壌中濃度の2013-2014年通年シミュレーションの予測値と実測値を示す。田面水中の3薬剤の予測最高濃度は、フィプロニルが2から3ppb、クロチアニジンが約250ppb、クロラントラニルプロールが約50ppbであった。対してこれらの実測値はフィプロニルで約0.1ppb、クロチアニジンとクロラントラニルプロールが約1ppbで、予測値は大きく過剰評価した結果となった。実験圃場スケールでのモニタリングの結果では、フィプロニルの田面水中最高濃度が1ppbから数ppb程度<sup>3), 15)</sup>、イミダクロプリドが約15ppbから74ppb<sup>2), 4), 16)</sup>、クロチアニジンが約20ppb(未発表データ)と報告されている。現地実土壌での田面水中濃度が低く抑えられた理由としては、箱施用剤の移植時のこぼれ落ちが少ない、土壌埋設深が深く田面水への溶出が制御された、灌漑水による希釈効果などが考えられる。灌漑水での希釈効果を除けば、圃場での適切な農薬管理により田面水中の薬剤濃度が低く抑えられたということが考えられる。

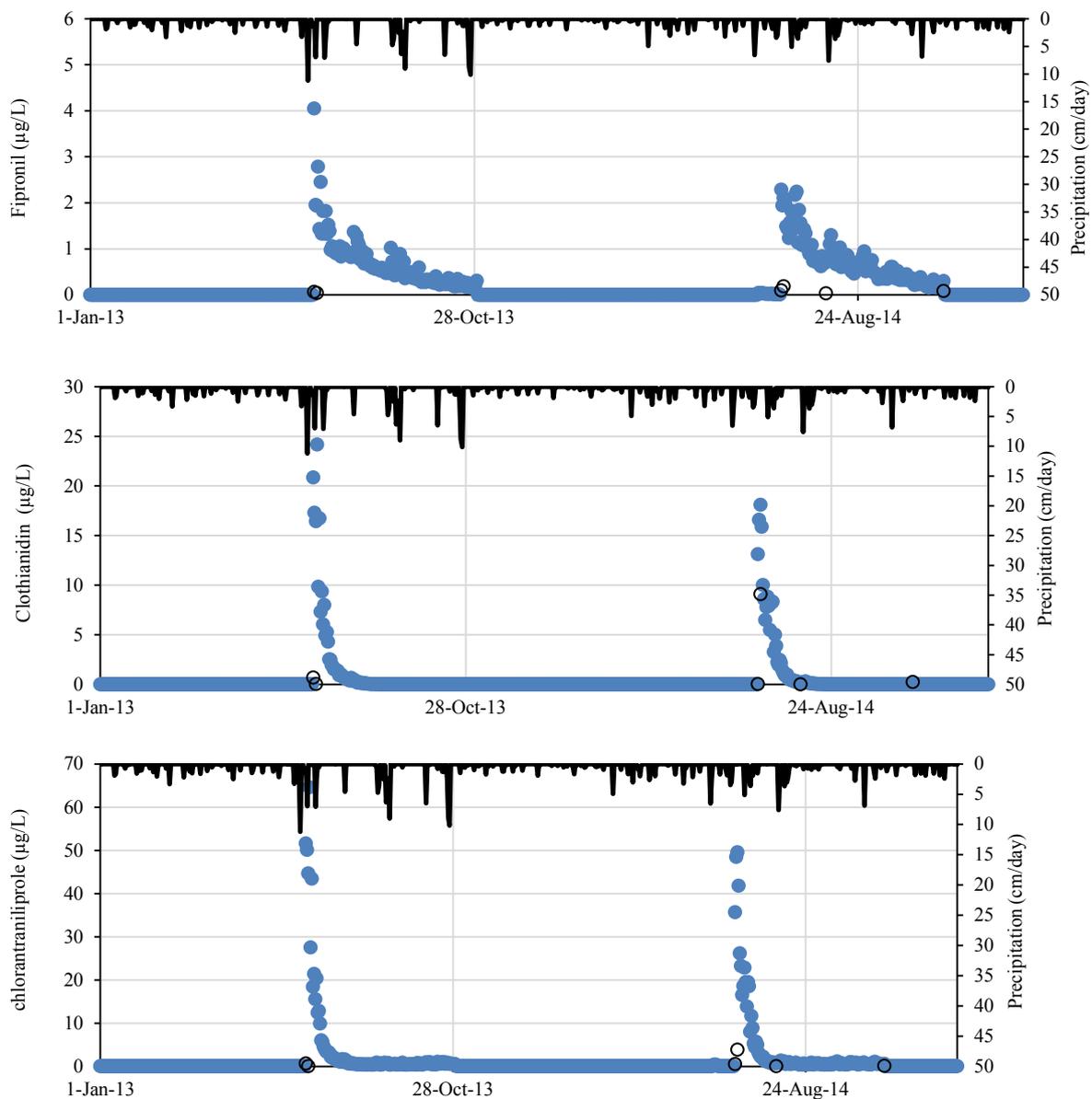


図 (2)-8. 実圃場におけるフィプロニル (上), クロチアニジン (中), クロラントリニリプロール (下) の田面水中濃度の平成 25-26 年通年シミュレーションの予測値 (●) と実測

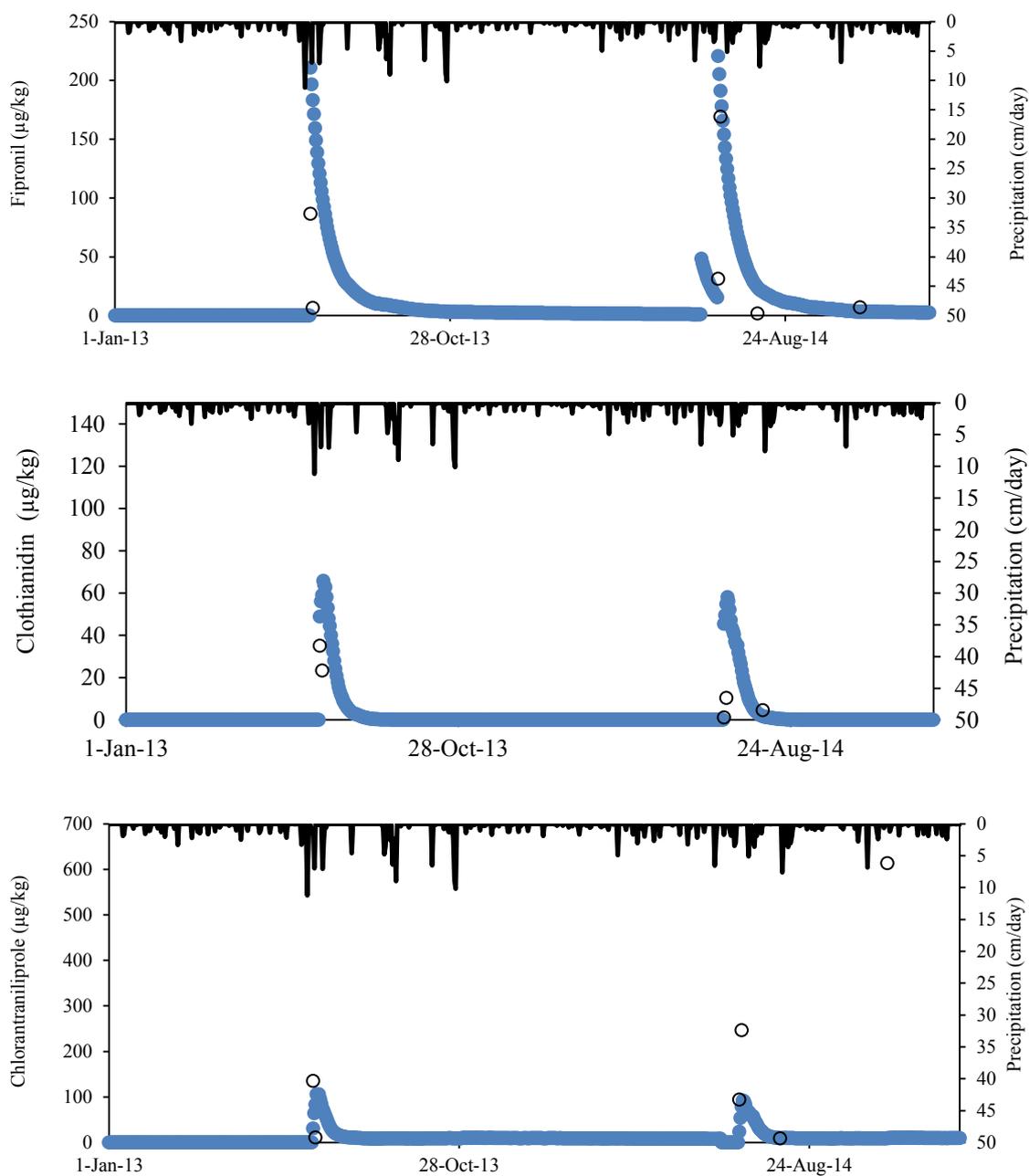


図 (2)-9. 実圃場におけるフィプロニル (上), クロチアニジン (中), クロラントリニリプロール (下) の土壌中濃度の 2013-2014 年通年シミュレーションの予測値 (●) と実測値 (○).

#### (4) 実圃場シナリオにおける長期シミュレーションおよび汚染水灌漑シナリオにおける農薬残留評価

##### 1) 10年間の連続施用シナリオによる残留農薬の長期動態シミュレーション

ここでは、上記で得られた実圃場の環境条件および農薬動態パラメータを用い、供試箱施用農薬、フィプロニル、クロチアニジン、クロラントラニリプロールの10年間の連続施用シナリオによる残留農薬の長期動態シミュレーションを行った。

図2-(10)にクロラントラニリプロールを例として水田環境中動態の10年通年シミュレーションの結果を示す。最初の4年間は、2013年2014年の気象条件を繰り返し、5年目以降は2013年の気象を毎年再現した。そのため農薬濃度の最高濃度の年変動は気象変動に対応している。10年間長期シミュレーションの結果の一般的な傾向としては、6月に薬剤が投下された直後に濃度がピークを迎え、その後、水田環境での降雨、灌漑、排水、降下浸透による水の入れ替わりにより田面水および土壌中での薬剤の消失が急激に進む傾向が予測された。収穫後非湛水状態では緩やかに消失が進み、6月の代かき時に下層土との農薬の均一化が起こり、一旦土壌中濃度は下がる。しかし、直後の薬剤投入で、同様の薬剤の動態が繰り返される。10年間のクロラントラニリプロールの田面水中および表層土壌中での動態は、上記の2012年-2013年の実圃場シナリオで予測された田面水および表層土壌での動態を繰り返す予測となり、この傾向は他の薬剤も同様であった。モデル計算における土壌中の農薬の吸着・脱着は平衡土壌吸着係数に基づき、可逆的に起こるプロセスであり、土壌浸透による薬剤の消失のため、年間ごとの蓄積は生じないという結果になった。一方理論的には土壌の長期残留は、土壌吸着の長期化（エイジング）の効果等を考慮すると吸着係数が大きい薬剤等はその可能性も懸念される。また、本研究で使用されたメソコズム施設や重粘土土壌等の圃場で降下浸透が非常に少ない場合は、土壌吸着した薬剤の消失が抑制され、土壌中の分解速度が遅い場合は、薬剤の長期残留は顕著になると考えられる。これらの仮定の検証には更なる圃場試験での追跡試験と、室内試験やライシメータ試験等による更なる農薬動態研究が必要であり、今後の課題である。

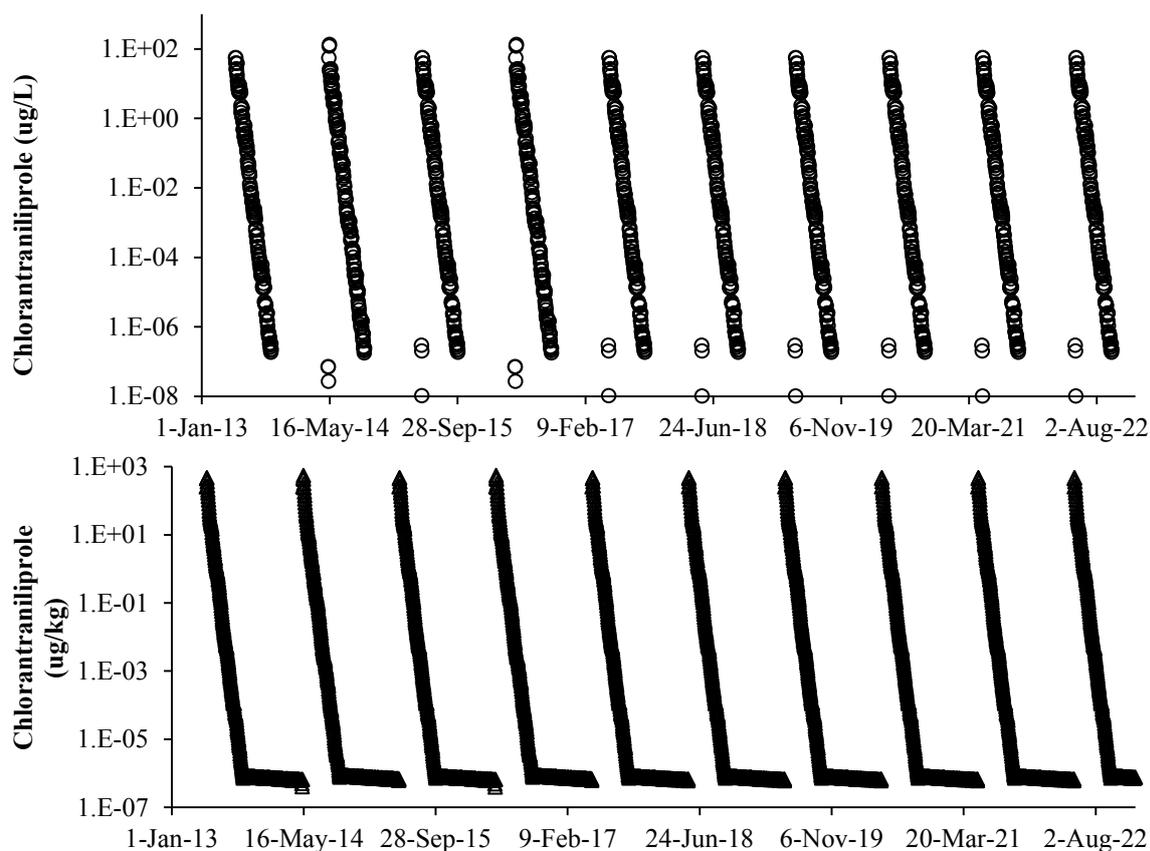


図 (2)-10. 実圃場におけるクロラントリニプロールの田面水中濃度（上）および土壌中濃度（下）の10年通年シミュレーションの予測値。

## 2) 汚染水灌漑シナリオにおける農薬残留評価

一般的に、中山間地水田で頻繁にみられる田越し灌漑や圃場整備水田でみられる循環灌漑においては、無処理区水田または異なる農薬を処理したにも関わらず、灌漑水とともに農薬が流入することが懸念される。サブテーマ3での圃場調査では、無処理区水田での顕著な農薬残留が確認されたが、その原因が特定されていない。ここでは、灌漑水と共に農薬が流入する農薬の残留影響をモデル解析によって調査した。ここで使用したシナリオは、上記で得られた実圃場の環境条件および農薬動態パラメータを基本とし、それぞれの予測最高濃度の50%の濃度の灌漑水が10日間流入するシナリオとした。本シナリオは、田越し灌漑や、水田集水域で同じ薬剤が使用された状況のような最悪シナリオとして採用した。

本研究でのモデルシミュレーションの結果では、田越し灌漑や圃場整備水田でみられる循環灌漑にともなう農薬の流入が無処理区水田における農薬残留に与える影響は少ないことが予測された。このため、実圃場での現地調査の結果の原因は残念ながら不明であるが、今後更なるモニタリングにより現状を把握し、圃場試験、室内試験を通して原因究明を行ってゆくことが今後の課題である。

### 【3年間の研究成果のまとめ】

本研究のモデルシミュレーションによる評価解析の成果として、表(2)-6に主要箱施用殺虫剤、フィプロニル、イミダクロプリド、クロチアニジン、クロラントラニプロールの環境動態と残留性の比較を示した。

フィプロニルは、田面水においては光分解における半減期が短く<sup>17)</sup>、また水溶解度も低く、土壌吸着性が比較的高い。土壌中からの溶出や田面水中の濁度による光分解への影響を考慮に入れても、田面水中の濃度は低く推移するため、移動性は低いと考えられる。一方土壌では、水田土壌中半減期は12-26日であり、長期残留特性は低いと考えられた。

表 (2)-6. 主要箱施用殺虫剤、フィプロニル、クロチアニジン、クロラントラニプロール、イミダクロプリドの環境動態と残留性の比較

薬剤名	水田動態データ	水田モデル検証	吸着性	移動性	土壌中残留性
フィプロニル	○ 農工大水田 (Jinguji ら 2013, Thuyetら 2013)2報	○ 農工大水田 (Boulange ら, 2014	高 Koc:825 Kd=15.0	低 水溶解度が低く(4ppm), 土壌吸着が高い	低 光分解は早い, 水田での生 化学的分解は比較的早い
クロチアニジン	△水田メソゾム △農工大水田 (本林未発表 データ)	○農工大水田	中 Koc:123 Kd=6.2	高 水溶解度が高く (340ppm), 土壌吸着が 中, リーチングの懸念	低 水田での生化学的分解は 比較的早い, 移動性が高い
イミダクロプリド	○ 農工大水田 (本林ら2012, Thuyetら 2011a, Phong ら2009, 3報)	○ 農工大水田 (Boulange ら, 2014	中 Koc: 132 - 310 Kd=12.2	高 水溶解度が高く (610ppm), 土壌吸着が 中, リーチングの懸念	低 光分解が早い, 水田での生 化学的解は比較的早い, 移動性が高い
クロラントラニプロール	△水田メソゾム	△水田メソゾム	中-低 Kd=3.2 Koc:328	中 水溶解度が低い (0.9ppm), 土壌吸着は中 -低	中 水田での生化学的分解は 比較的早いが移動性が 中程度

イミダクロプリドとクロチアニジンは、その物理化学性がよく類似している。イミダクロプリドもクロチアニジンも光分解速度が非常に速い。イミダクロプリドの田面水中半減期は約2日であるが、クロチアニジンの水溶解度はイミダクロプリドと同様に高く、そのため田面水中濃度もイミダクロプリド<sup>2)</sup>と同程度に比較的高い。よって田面水の流出および循環灌漑等で水田集水域内外に移動拡散する可能性はイミダクロプリドとクロチアニジンは同様に高いと考えられる。土壌中半減期は農薬動態パラメータで比較するとイミダクロプリドとクロチアニジンはフィプロニルより長く、フィプロニルの土壌吸着性が比較的高いことから、それらの残留性はフィプロニルより高いと考えられる。

クロラントリニルプロールは、他の2薬剤と比較して水溶解度が低い、田面水中の濃度は水田メソコズムの場合も、下記の実圃場調査の場合も他の薬剤と同等の濃度レベルであった。水田土壌においては、土壌吸着係数はイミダクロプリドやクロチアニジンと同等もしくは低い報告がされている<sup>14)</sup>。土壌中の分解半減期は、酸化土壌で597日、畑土壌で204日と報告されており<sup>14)</sup>、水田メソコズム試験データによるモデル入力値の調整の結果でも半減期が228日となっている。このため、水田土壌での長期残留の可能性が3薬剤の中では一番高いと考えられる。しかし土壌浸透などによる土壌からの脱着が顕著の場合は、土壌からの脱着やリーチングにより迅速な消長が期待される。

本研究における水田メソコズムでの実測濃度の予測に関して、薬剤の田面水および土壌中での農薬動態は、土壌分解性、水溶解度、土壌吸着性等の物理化学性を反映し、相対的に比較可能である。降下浸透が生じない水田メソコズムでは、降下浸透による土壌中濃度の消失が少なくなり、モデル予測においてもそのような傾向が示された。

しかし、降雨等の気象条件、灌漑排水、浸透等の水管理条件、さらには農薬処理等の圃場管理条件を考慮すると、農薬動態は非常に複雑になる。物理化学データでは、室内試験のような、水移動等がない状態での農薬動態の推測は可能であるが、環境条件および圃場管理条件が変動する状況では、これらの変動を考慮した農薬動態予測モデルが必要である。本研究で開発されたモデルは、水管理や農薬処理条件を適性条件として制御した実験圃場における農薬動態モニタリングの結果においては、薬剤の水田環境中の動態を高い精度で予測することが可能となった。

一方、実圃場水田では、水管理条件、土壌条件、圃場管理条件、農薬処理の条件など多くの不確実性要因が、農薬の水田環境での動態に影響する。試験圃場の場合も実圃場の場合も、湛水期間では、降下浸透の影響で農薬の消長が早く、非湛水期間では農薬分解が顕著でない場合でも、農薬の長期残留は顕著ではない予測結果になった。このため、実圃場水田で検出された比較的高濃度の残留のメカニズムは、現在のモデルでは解明することができない。土壌吸着の長期化（エイジング）の効果等を考慮すると吸着係数が大きい薬剤等は長期残留の可能性も懸念される。また、本研究で使用されたメソコズム施設や重粘土土壌等の圃場で降下浸透が非常に少ない場合は、土壌吸着した薬剤の消失が抑制され、土壌中の分解速度が遅い場合は、薬剤の長期残留は顕著になると考えられる。これらの仮定の検証には更なる圃場試験での追跡試験と、室内試験やライシメータ試験等による更なる農薬動態研究が必要であり、今後の課題である。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

箱施用殺虫剤の長期残効性の評価に関して、湛水条件での農薬動態予測モデルと非湛水条件での農薬動態予測モデルを結合した湛水-非湛水統合農薬動態モデルを構築した。室内試験、水田メソコズム試験、圃場試験を通して予測モデルの検証および評価を行い、それらの結果から得られた知見により、箱施用殺虫剤の水田環境での通年動態予測、環境影響評価が可能となった。

## (2) 環境政策への貢献

### <行政が既に活用した成果>

該当なし

### <行政が活用することが見込まれる成果>

今後の環境政策の立案および提言に適用可能な農薬の環境中移行動態の予測モデルの構築と検証を行った。

## 6. 国際共同研究等の状況

該当なし

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文(査読あり)>

- 1) Boulange J, Thuyet JD, Jaikaew F and Watanabe H: (2016) Pest Manag Sci; 72: 1178-1186, DOI 10.1002/ps.4096, Simulating the fate and transport of nursery-box-applied pesticide in rice paddy fields.

#### <その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない。

### (2) 口頭発表(学会等)

- 1) Boulange J, Thuyet DQ and WATANABE H: 日本農薬学会第39回大会, 講演要旨集p.162, 京都大学, 3月13-15日(2014)  
“Validation of a model for predicting the behavior of Nursery-Box-applied pesticides (PCPF-NB) in paddy environment.”
- 2) Watanabe H, Thuyet DQ, Boulange J, Thuy DQ and Motobayashi T: 13th IUPAC International Congress of Pesticide Chemistry, Aug. 10-14, San Francisco, California USA. (2014)  
“Monitoring and modeling the environmental fate of nursery-box-applied insecticides and their metabolites in rice paddy.” (招待講演、要旨 No. 791)
- 3) Boulange J, Thuyet D Q, Jaikaew P, Watanabe H, GOKA K, KASAI A and Hayashi TI: 日本農薬学会第40回大会、講演要旨集 p.134, 玉川大学、3月18-20日(2015)

“Year around simulation of fate and transport of nursery-box applied pesticide in rice paddy field.”

- 4) Watanabe H, Boulange J, Piyanuch J, Malhat F and Saber F: The 1st International Conference on Environment, Livelihood, and Services: Environment for Life. November 2-5, Bangkok, Thailand. The Chaipattana Foundation and The Kasetsart University. The Centara Grand and Bangkok Convention Center at Central World (2015)  
 “Monitoring and Modeling of Pesticide Fate and Transport in Agricultural Environments.”  
 (Invited key note speech, Abstract No. A04004) (招待講演/講演要旨)
- 5) Malhat F, Boulange J, Jaikaew P, Saber A and Watanabe H: The 1st International Conference on Environment, Livelihood, and Services: Environment for Life November 2-5, Bangkok, Thailand, The Chaipattana Foundation and The Kasetsart University. The Centara Grand and Bangkok Convention Center at Central World (2015)  
 “Neonicotinoids and Fipronil Insecticides Transport and Fate from/in Upland Field under Simulated Rainfall Events.” (Abstract No. A04002) (一般講演/講演要旨)
- 6) Saber A, Malhat F, Boulane J, Jaikaew F and Watanabe H: The 1st International Conference on Environment, Livelihood, and Services: Environment for Life November 2-5, Bangkok, Thailand. The Chaipattana Foundation and The Kasetsart University. The Centara Grand and Bangkok Convention Center at Central World (2015)  
 “Degradation of fipronil in andisol soil under different temperature and moisture regimes: laboratory study.” (Abstract No. A04003) (一般講演/講演要旨)
- 7) Malhat F and Watanabe H. Field-scale runoff of imidacloprid, clothianidin and fipronil from upland field under simulated rainfall events. 日本農薬学会第41回大会、講演要旨集p.118、島根大学、3月17-19日 (2016) (講演要旨)
- 8) Malhat F and Watanabe H. Impact of temperatures and moisture regimes on the degradation of imidacloprid, clothianidin and fipronil residues in andisol soil: Laboratory study. 日本農薬学会第41回大会、講演要旨集p.119、島根大学、3月17-19日 (2016)

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

### (5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

## (6) その他

特に記載すべき事項はない。

## 8. 引用文献

- 1) Asaka S, Kawauchi N, Koyama S, Emura K (1978) Fate of Propaphos (Kayaphos) *Applied on Seedling Box. J. Pestic. Sci.*, 3(3):305-310
- 2) Thuyet DQ, Watanabe H, Motobayashi T (2011). Effect of formulations and treatment methods of nursery boxes applied with insecticide on the behavior of imidacloprid in rice paddy fields. *J. Pestic. Sci.*, 36(1):9-15
- 3) Thuyet DQ, Watanabe H, Motobayashi T, Ok J (2013) Behavior of nursery-box-applied fipronil and its sulfone metabolite in rice paddy fields. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 179(0):69-77
- 4) Phong T, Nhung, D, Motobayashi T, Thuyet D, Watanabe H (2009) Fate and Transport of Nursery-Box-Applied Tricyclazole and Imidacloprid in Paddy Fields. *Water, Air, Soil Pollut.*, 202(1-4):3-12
- 5) Sánchez-Bayo F, Goka K (2006) Ecological effects of the insecticide imidacloprid and a pollutant from antidandruff shampoo in experimental rice fields. *Environ. Toxicol. Chem.*, 25(6):1677-1687
- 6) Thuyet DQ, Hirozumi W, Takagi K (2012) Behavior of nursery-box-applied imidacloprid in micro paddy lysimeter. *J. Pestic. Sci.*, 37(1):20-27
- 7) Inao K, Kitamura Y (1999) Pesticide paddy field model (PADDY) for predicting pesticide concentrations in water and soil in paddy fields. *Pestic. Sci.*, 55(1):38-46
- 8) Watanabe H, Takagi K (2000) A simulation model for predicting pesticide concentrations in paddy water and surface soil II. Model validation and application. *Environ. Technol.*, 21(12):1393-1404
- 9) Watanabe H, Takagi K (2000) A simulation model for predicting pesticide concentrations in paddy water and surface soil. I. Model development. *Environ. Technol.* 21(12): 1379-1391
- 10) Watanabe H, Takagi K, Vu SH (2006) Simulation of mefenacet concentrations in paddy fields by an improved PCPF-1 model. *Pest Manage. Sci.*, 62(1):20-29
- 11) Boulange J, Thuyet DQ, Jaikaewa P, Watanabe H (2016) Simulating the fate and transport of nursery-box-applied pesticide in rice paddy fields. *Pest Manag Sci.*, 72:1178-1186
- 12) Allen RG, Smith M, Perrier A, Pereira LS (1998) Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper 56 Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome
- 13) Thuyet DQ, Watanabe H, Jaikaew P, Bulange J, Saito H, Ishihara S, Iwafune Ta, Kitamura Y (2014) Pesticide fate and transport in volcanic ash agricultural soil: Monitoring and modeling 13th IUPAC International Congress of Pesticide Chemistry, Aug. 10-14,

San Francisco, California USA, (abstract No. 515)

- 14) Lewis KA, Green ATJ, Warner D (2015) The Pesticide Properties Data Base (PPDB) developed by the Agriculture & Environment Research Unit (AERU), University of Hertfordshire , 2006-2015
- 15) Jinguji H, Dang QT, Ueda T, Watanabe H (2012) Effect of imidacloprid and fipronil pesticide application on *Sympetrum infuscatum* (Libellulidae: Odonata) larvae and adults. *Paddy and Water Environment* 11:277-284. DOI 10.1007/s10333-012-0317-3
- 16) 本林 隆, 源河 正明, Thai Khanh Phong, 渡邊 裕純. (2012) イミダクロプリドの製剤および施用方法の違いが水田に生息する水生昆虫に及ぼす影響. 日本応用動物昆虫学会誌 (応動昆) 第56 巻 第4 号 : 169-172.
- 17) Thuyet DQ, Watanabe H, Yamazaki K, Takagi K (2011) Photodegradation of Imidacloprid and Fipronil in Rice-Paddy Water. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 86:548-553

### (3) フィールド調査による地域レベルの水田生物多様性影響評価

愛媛大学大学院 農学研究科 日鷹一雅

#### <研究協力者>

愛媛大学農学部 研究員 久松定智  
同 研究員 長場義樹

平成25(開始年度)～27年度累計予算額：21,728千円（うち平成27年度：7,028千円）

予算額は、間接経費を含む。

#### [要旨]

本サブテーマでは、日本全国の純農村地域に長年存立してきた水田地帯において、実際に施用した水稲用苗箱農薬が水田生物多様性にどのような諸影響を与えうるかについて、生産者が耕作する実水田において野外実験系を組み、苗箱農薬の水田生物多様性への影響評価について明らかにすることを目的とした。平成25年度は箱施用殺虫剤の使用状況について、全国レベルから地域レベルまで資料収集などにより調査を行った。さらに、実水田で可能な実際的な調査手法の検討を行うために、瀬戸内に研究拠点を開設し、水田メソコズムと同様の農薬処理による水田生物多様性への影響評価の試行を始めた。平成26年度からは、前年度に開発した枠すくい取り法による調査法の修正を行いながら、瀬戸内以外の拠点における実水田の調査を展開し、北日本をのぞく地域で調査拠点を構築した。また群集組成への農薬影響が顕著に見られないことから、農薬の影響評価の候補種の選定にとりかかり、トンボ類などに着目し、最終年度に向けて、サブテーマ1の結果も交えながら、影響評価の野外実験を進めた。4種類の農薬の3年間の連用実験を実水田で継続したところ、トンボ類の成虫はどの水田でも生息し産卵していたが、ヤゴ類の発生がフィプロニル処理区だけで認められなかった。また産卵時期のアキアカネ、ナツアカネは成虫では多数確認できたが、無処理区を含め野外水田では発生が認められなかった。この農薬影響について、実水田の環境中の農薬分析を含め、他のサブテーマとも協力して解明にあたったが、実水田では水田メソコズムでは発生していない状況が発生していた。野外水田における農薬の影響は、単に連用した農薬成分の生物群へのインパクトだけではなく、残留か流入かは現在不明であるが、その水田地帯の履歴として使用されてきた農薬のインパクトも加わり、水田生物多様性に影響を与えているという新しい農薬影響の実態が初めて明らかとなった。今回の農村現地における野外水田の調査結果から、農薬の水田生物多様性への影響評価を行う場合には、必ず事前の農薬利用履歴を個別生産者スケールから農村地域スケールで調べ、使用農薬の連用にも気を配ることが重要であることが示された。また、指標種としては広域に移動しながら水田に産卵し、水田注水後に発生するトンボ類やコマツモムシ、マツモムシといった半翅目が苗箱農薬指標種の候補としてあげられた。

#### [キーワード]

生態リスク評価、浸透性移行殺虫剤、水田生物多様性、水田生態系、リスク管理

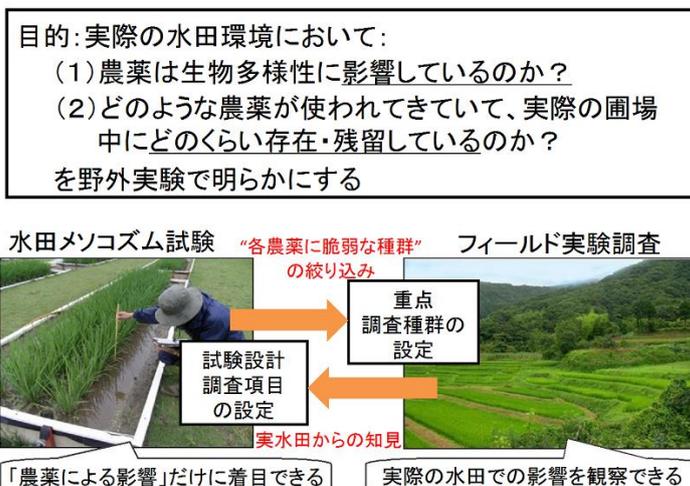
## 1. はじめに

水田は、我が国ではもっとも古くから行われてきた農業生態系を形成している<sup>1)</sup>。水田をつくり維持するためには、整備された水利システムとその管理に必要な人的管理が不可欠で、農村社会があって水田生態系や里山が存立できうる。このように、純農村に長年存立し継続してきた水田（ここでは「実水田」と呼ぶ）は、本事業の目的の一つである豊かな生物多様性を形成する基盤をつくってきたと考えられている。

一方で水田には、農業生産のための様々な環境操作が作用し、それは水田生物多様性にとっていいことばかりではなく、その一つに農業病害虫を防除するための農薬がある。我が国の水田のうちの99%以上において農薬が使用された水稻栽培が行われており、本研究課題の目的である水田生物多様性への農薬類の影響評価を進展させることは、水田生物多様性を保全する上で避けては通れない道であると言える。しかしながら、農薬の水田生物多様性への影響評価に関する私たちの理解度は大変乏しく、水田生態系を舞台とした農薬と生物多様性との関係は分からないことだらけである。また一口に水田といっても、北から南に長い距離がある日本列島の津々浦々で水田栽培が行われ、その栽培技術だけとって多様性があり<sup>2)</sup>、水田生物多様性と水稻作の多様性の関係は意外に複雑で、こと農薬についても多様な病害虫に対して多様な種類の農薬成分が使われている。そのため、水田生物多様性への農薬類の影響評価を現地で行う場合にも、どのようなアプローチを取るかが重要となる。

そのような複雑多岐な事象に挑む場合には、とっかかりとなるモノが必要であり、本研究課題における、水田メソコズムというミニチュア水田の実験系から得られた仮説や機作についての知見などを基に、野外の実水田における農薬の生物多様性への実態を解き明かしていくアプローチは有効な近道となる可能性を秘めている（図(3)-1）。そこで、本サブテーマでは、本報告書で前出の水田メソコズムを進めるサブテーマ1、および農薬の動態予測モデルを追求するサブテーマ2と相互連携の上で、総合的評価システムの構築を目論むサブテーマ4とともに、日本の実水田の生物多様性への農薬影響評価の一端について明らかにする一連の野外研究を行った。

### サブ3：フィールド調査による地域レベルの水田生物多様性評価



図(3)-1 水田メソコズムと実水田の相互フィードバック

## 2. 研究開発目的

本サブテーマの主な目的は、他のサブテーマからの知見も集約し予測を立てながら、実際の農村フィールドにおける水田生物多様性の影響評価手法の開発を行う。とくにサブテーマ1の水田メソコズムから得られた影響評価の情報については、本テーマでは相互補完的な意味合いの解明を行うことが目的である。

具体的な目標として、(1) 水田での苗箱使用殺虫剤の実態把握調査では、とくに今回は広く普及している苗箱農薬に着目し、全国の水田でどのような薬剤成分が使われているかについて、既存の統計資料だけではなく、実際に農村や地域における実態調査を行い、より具体的に農薬使用の多様な実態を明らかにしようとした。このような普及情報なしに、適正な生物多様性への農薬類の影響評価はおぼつかないのは言うまでもないであろう。次に、(2) 全国調査体制の構築では、全国の多様性豊かな水田生態系を俯瞰しながら農薬の影響評価について進めるための研究の初期基盤を構築するのが目的である。水田生物多様性の生物地理学的な側面や地域の水稲栽培技術の多様性にも留意しながら、全国規模の影響評価実験を行う試行を行った。また、(3) 農村フィールド影響評価法の開発では、本事業の水田生物多様性の影響評価に資する、効率的かつ簡易で汎用性があり、かつ科学的リテラシーを伴う調査手法について試行錯誤しながら吟味し、新たな手法を確立する。さらに、(4) 生物群集組成および薬剤濃度の調査では、(1) から (3) までの手法的な土台の上で、水田生物群集の動態と、殺虫剤成分の濃度について実測し、両方の定量的なデータの関係性から、野外水田における農薬の影響評価の実態を明らかことを目的とする。最後に、(5) 野外水田における影響評価指標種の選定では、サブテーマ1の水田メソコズムと比較して多様な種群との遭遇が予想される実水田において、農薬のインパクトの影響を評価しやすい種群の候補をリストアップすることを目的とする。

以上、これら一連の研究業務によって、野外の水田生物多様性に対する農薬類の影響評価の総合的手法の中で、全国の野外水田での適正な手法を試行錯誤し示しながら、農薬類と水田生物多様性の関係性の実態の一端について明らかにしたい。

## 3. 研究開発方法

サブテーマ1におけるメソコズムによる統制された実験系で得られる結果についての野外検証の可能性の検討を念頭に置きながら、メソコズムとは違う野外の実際の水田生態系の特徴を意識して、以下の手法を用いて、3年間の研究期間中に全国の調査体制を段階的に構築し調査研究を進めた。

### (1) 水田での苗箱使用殺虫剤の実態把握調査

わが国で使用されてきた水田における殺虫剤使用の多様性は、大変多種多様な薬剤成分がブレンドされ田畑に施用されている。栽培者がどの農薬を選ぶのかは、地域的な害虫防除・管理の戦略に乗っ取り行われている。そこで、実際の農薬をどこで、いつ、どのように施用するかについて調査していくアプローチについて検討を重ね各地で資料収集を進めた。地域や生産農家ごとの農薬成分の選択、施用は、最終的には生産者の意思決定によるのはもちろんであるが、多様な薬

剤の選択は地域の農協（以下、JA）の営農指導、またそれらを指導する都道府県の農業試験場、病虫害防除所の防除指針の具体的な内容と、農薬の流通システムを司る全農や販売業など農薬販売の実態の両方の兼ね合いに影響されていると予想されたので、それら多様な情報収集を目的に現地訪問した。特に、研究拠点形成を推進した瀬戸内地域では、地域の使用農薬について過去の履歴も含めて生産農家へのアンケートおよび聞き取り方式によって実態調査を行った。

## （２） 全国調査体制の構築

水田生物群集の生物地理学的な多様性を考慮し、全国の複数のエリアにおいて調査フィールドの設定を進め、調査体制および調査システムの確立のための予備調査を進めた。水田は元来私有地であり、所有者、耕作者の同意はもちろん、日本独自の社会構造であるムラ（集落）の同意形成を得て、研究フィールドを構築する必要がある。また水田生態系の農薬の挙動を追跡する必要もあり、分析のためのサンプル保存のための調査インフラも整備する必要がある。現地での研究フィールドの構築のためには今回の研究組織外の研究協力者についても多く探し当てる必要があり、調査フィールドの拠点である日本列島の東西の2拠点純農村地帯2地域（瀬戸内・関東）と、瀬戸内拠点と北関東拠点での実験をまず初年度に開設することから着手し、その後、生物地理学および農生態系の多様性と関連した日本全国の水田生物多様性の異質性などに留意し、予備調査と現場合意形成をしながら、全国展開を進めていく事にした。

## （３） 農村フィールド影響評価法の開発

各種苗箱薬剤成分を連用処理したメソコズムにおける影響評価と、本野外水田における評価結果の連携を相互補完的にするためには、水田群集の動態の中でも互いに情報交換可能な群集構造や分類群に着目し、定量的な調査を進める必要がある。また調査法は、サイズ、形状が画一的で系統配置されたメソコズムではない複雑な環境要因が重層的に関与する野外水田群を対象にするので、面積あたりの標本数を計数するサンプリング手法を開発の目標とした。さらに、本研究課題で開発した調査法の今後の一般化も考慮し、より簡便で安価な採集サンプリング方法についても加味し、サブテーマ4とも協力して調査計画を更に検討した。3年間で種々の調査手法を試行しながら、農薬の生物多様性への影響評価が可能な総合的手法について検討を重ねた。

## （４） 生物群集組成および薬剤濃度の調査

水田における生物群集の動態をモニタリングするだけでは、農薬の影響評価にはならない。実際に調査水田ごとに存在する農薬成分の動態を把握し、それと各種生物群との関係を明らかにしていく必要がある。そこで、純農村地域の現地フィールドの一部で、農薬使用履歴が明らかな水田を確保できた場合に、野外実験系を構築することにした。今後の野外評価手法を明らかにする上で重要な諸情報を得るために、研究チーム全体で相談し、とくにサブチーム1と連動しながら、詳細な影響評価のための調査実験区（フィプロニル・イミダクロプリド・クロラントラニリプロール・クロチアニジン・無処理区）を、実水田に設けた。実際に用いた農薬は、前出の4成分の殺虫成分を主要成分に含む市販品であるが（図(3)-2）、現地の農業生産者の希望もあり、イミダクロプリド以外の殺虫剤については殺虫成分が単剤であり、すべて同じ成分のいもち病の殺菌剤が含まれている。したがって、原体を用いて実験する水田メソコズムとは、殺虫剤成分では同様であっ

ても、殺菌剤を含む点で異なっている。実際の施用にあつたては、厳密な薬剤の秤量とコンタミに留意した移植時の水田施用を行った。代掻き、移植、中干し前までを目安に、定期的に田面水と水田土壌を採取し、サブテーマ1のメソコズム水田で行われている手法で薬剤濃度の分析定量を行い、水稲苗移植時の各種農薬施用後および主要な履歴使用殺虫剤の薬剤濃度の挙動を実測した。

#### (5) 野外水田における影響評価指標種の選定

水田メソコズムから得られた指標候補種を参考にしながらも、多様な種群が出現する実水田における各種生物分類群の密度推移について、対照区と処理区との比較類推を通して、農薬類の影響指標になるような候補種について選定を進めた。

### 野外水田実験における苗箱剤

商品名	成分(殺虫・殺菌剤)	薬剤系
ダントツオリゼメート	クロチアニジン 1.5% +フロベナゾール 10.0%	ネオニコチノイド系
Dr.オリゼプリンズ	フィプロニル 1.0% +フロベナゾール 24.0%	フェニルピラゾール系
Dr.オリゼフェルテラ	クロラントラニプロール 0.75% +フロベナゾール 24.0%	アントラリニックジアミド系
フルサポート	イミダクロプリド 2% +スピノサド・チフルザミド・トリシクラゾール	ネオニコチノイド系

図(3)-2 実験に供試した殺虫・殺菌剤の成分構成

## 4. 結果及び考察

### (1) 水田での苗箱使用殺虫剤の実態把握調査

#### 【平成25年度業務】

各地域や集落における水田で使用される農薬類については、まず端的に表すデータ資料としては、JAを通じて地域に配布される稲作暦がある。また、日本植物防疫協会が毎年発刊する農薬要覧によれば、これまでと同様に、フィプロニル・クロチアニジン・クロラントラニプロール・イミダクロプリドの4殺虫剤が基幹防除薬剤として全国で広く使用されていたのかのおよその見当はつく(図(3)-3左図)。

### 【平成26年度業務】

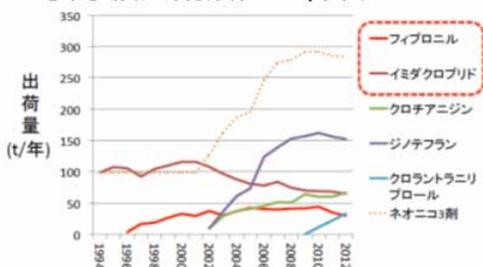
全国的に調査した愛媛、広島、石川、三重、鹿児島、大分、鹿児島、茨城、岩手、北海道空知地方では、4成分のいずれかが主力薬剤の含有成分として使用されていたが、とくにクロラントラニプロールを含有した苗箱剤使用は研究拠点である愛媛県や茨城県を除き、各地域における普及が目立つ傾向にあり（図(3)-3右図）、それ以外の新規薬剤の使用は認められなかった。

研究拠点形成を推進した瀬戸内拠点では地域の使用農薬について過去も含めて実態調査を生産農家へのアンケートおよび聞き取り方式によって行った。20年間の苗箱剤の主力成分はイミダクロプリド⇒フィプロニル⇒イミダクロプリドという使用変遷であったことは明らかであり、現状の水稲防除体系では、基幹病害虫防除農薬としてイミダクロプリドを含む殺虫・殺菌剤が苗箱剤使用されていくことがわかった。さらに詳しい調査から、平成16年当時からイミダクロプリドが苗箱剤として継続して地域的に使用され、それ以前はフィプロニルであることが新たに判明するとともに、フィプロニルを防除農薬に選択するケースはないではないが減少傾向にあった。実際に全国の傾向である図(3)-3右図でも、フィプロニルは減少傾向にあるのが続き、本研究課題を開始した2013年度は45t/年、2014年度で38 t/年と2010年のピーク使用時の四分の三程度の出荷量に減少してきている。一方、広く普及していたイミダクロプリドは2013年度65t/年、2014年度は63 t/年とこの5年間で大きな変動はなく、現在普及して継続使用の傾向が読み取れる。これらこの10年来の使用成分（1%粒剤）2剤に比べると、新規苗箱剤のクロラントラニプロールの出荷量（ピメトロジンとの混合剤）は、2011年の44.5t/年から2012年115.7t/年、2013年度129.4、2014年度は199 t/年には大幅に出荷量を増しており、全国の一部の地域しか見ていないのにもかかわらず、本実態調査の傾向を裏付ける状況にある。また、クロチアニジンは、68.1t/年から2013年41.4t/年、2014年71.2 t/年と変動傾向にあり、実際に今回全国調査した農村では、2013年以降で水稲用苗箱剤として使用されてはいなかった。

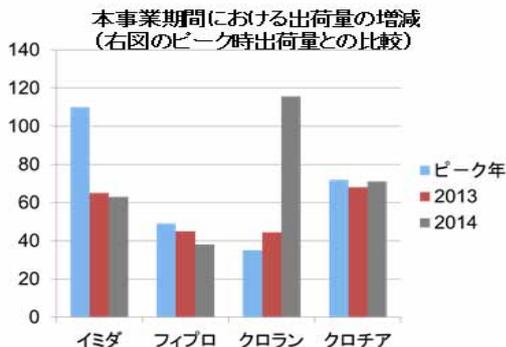
### 【平成27年度業務】

前出の日本植物防疫協会の2015年度の農薬要覧は未発刊のため、水稲用育苗剤の使用量の全国的なトレンドは不明であるが、各地域、前年度と同様の傾向であった。もう一つの東日本の拠点であるつくば市周辺など関東一円では、カーバメート系の薬剤とともにクロチアニジンも一部の生産農家に普及していた。以上のような調査から、全国各地域における水稲苗箱農薬の主要殺虫成分の使用状況を整理して、図(3)-4に示した。全国津々浦々の調査ではないため、北は北海道から南は鹿児島県までの苗箱使用薬剤の概略を示したにすぎないが、今回本事業の計画当初に選択した農薬類4種（フィプロニル・クロラントラニプロール・クロチアニジン、イミダクロプリド）のうち、クロチアニジンを除く薬剤は、ここ3年間の出荷量の変化（図3-(3)右図）からも読みとれるように、全国で広く水稲苗箱剤の主要殺虫成分として普及していたと考えてよい。ただし、地域の水田生物多様性への農薬類の影響評価を実施することを念頭に考えると、個別の地域や生産農家がどの薬剤を使用し、また使用してきたかについての細かな情報収集が肝要である。そういう意味では、生物多様性と同様に、農多様性（agrodiversity）の一つとして<sup>3)</sup>、農薬使用についても逐一生物相や生物群集と同様に、詳細な景観レベルの記述調査などといった、より実態に即した調査研究を進めていく必要があると考えられた。このことは、後に述べる今回得られた水田圃場の農薬成分の実測データからも強く言えるものである。

日本の水田で使用される  
主要な殺虫剤成分の普及トレンド

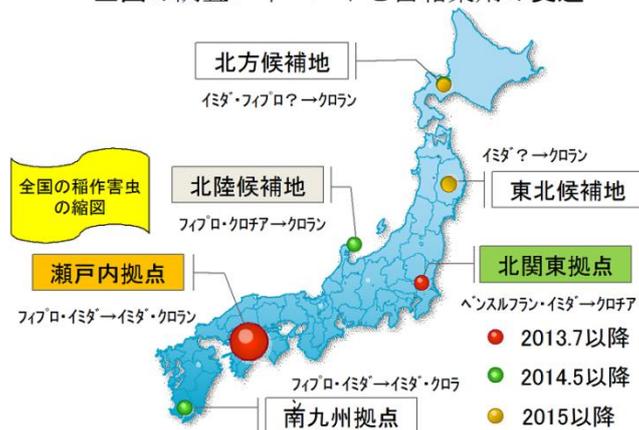


日本植物防疫協会「農薬要覧」より



図(3)-3 供試苗箱剤4種の殺虫剤とその他主力薬剤の20年間の出荷量変化（左）と事業期間の増減（右）

全国の調査フィールドと苗箱薬剤の変遷



図(3)-4 調査拠点地域一帯の苗箱薬剤の主要殺虫成分（薬剤名は略記）

(2) 全国調査体制の構築

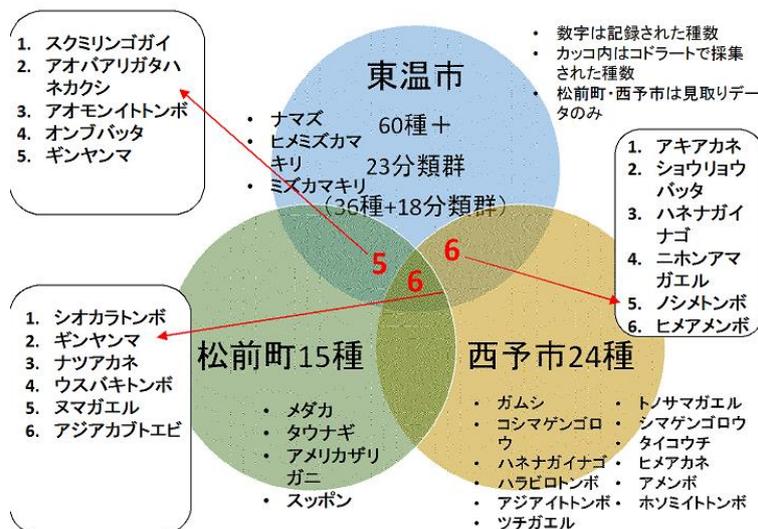
3年間の研究期間の中で、瀬戸内・関東の拠点は最終年度まで継続・発展させるとともに、2年目には北陸、南九州、最終年度は新たに北海道、東北の水田実験系を開設し、北海道から南九州までの全国野外実験調査体制を徐々に進展させることができた（図(3)-5）。



図(3)-5 全国調査の展開過程

【平成25年度業務】

まず瀬戸内拠点において、現地の農薬実験と調査に理解のある生産農家を訪ね、異なる地域で主要な水稲作地域の3地域で調査を進めることにした。今回の新たな調査で得られた種数と分類群数（後者は種同定まで落としていないサンプル）は、東温市（11水田）で、60種33分類群であり、そのうち杓搦とり法で半数以上の33種23分類群が採集された。今回予備的に調査候補地とした松前、西予の水田では杓搦取りのデータはなく、見取り調査だけであるが、15種と24種が新たに加わるので、初年度の段階では愛媛県3地点の水田で同定した種だけで100種近い生物が確認され豊かな生物多様性の一端が見られた（図(3)-6）。ベン図の交わった数値は、共通種数を示すが、以外と少なく5~6種であった。さらに分類同定と調査エフォートを同程度にすることによって、採集種数の精度を向上させる必要性はあるが、水生動物主体でも水田生物多様性の地域レベルの種多様性の豊かさの一端を垣間見ることができた。



図(3)-6 瀬戸内拠点3地域における採集分類群数

**【平成26年度業務】**

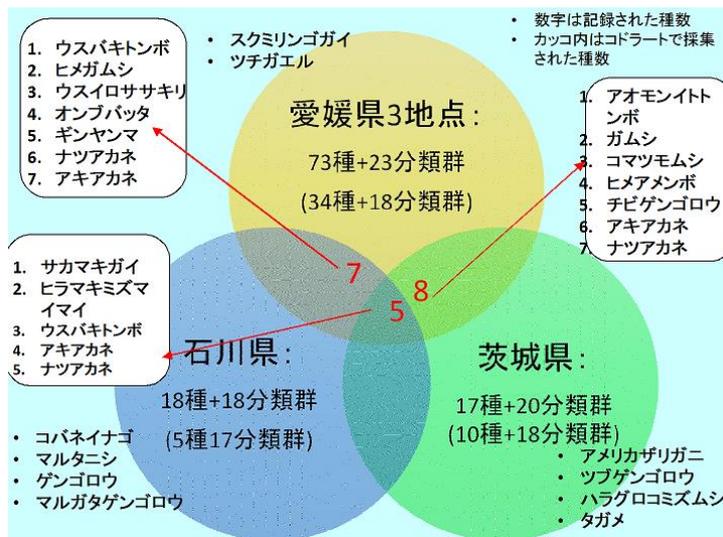
初年度の瀬戸内拠点に加えて、さらに、生物地理学的な違いが多々あると予想されている茨城県つくば市の関東拠点、北陸の能登半島を加えて採集種数について更に検討を加えた(図(3)-7)。水田生物群集の構成種数はそれぞれ18種18分類群、17種20分類群が採集されており、共通種数は少ないため、拠点フィールドを全国に展開する本計画の意義は大いにあると考えられた。

**【平成27年度業務】**

昨年度得られたサンプルのソーティングを進め、コドラード法により採集できた生物サンプル総数だけで、東温市5回の採集で1,494個体、つくば5水田1回の採集では233個体、鹿児島5水田1回の採集で127個体に上った。また、今回の総数からはカウントに時間のかかるユスリカ及びプランクトン類(カイミジンコ・ケンミジンコ・ミジンコ)を除いている。コドラート法により採集された生物サンプル総数の構成分類群ごとの内訳について、東温市を例に示すと、昆虫綱が52.3%と約半数を占め、続いて貝類(腹足綱)が29.5%、ホウネンエビなど鰓脚綱が8.09%で、あとは多様な分類群が少ない割合で続いた。また、今回コドラート法・夜間見取りにより確認された種数と分類群数は、東温市(13水田)で、38種13分類群であり、そのうちコドラート法で半数以上の30種13分類群が採集された。さらに、種構成において生物地理学的な違いが多々あると予想されている茨城県つくば市、鹿児島を加えると、水田生物群集の構成種数はそれぞれ20種14分類群、19種10分類群確認された。

拠点ごとに構成種は大きく異なり、例えば関東拠点周辺ではツブゲンゴロウ、南九州拠点周辺では西南暖地の分布種であるウスイロシマゲンゴロウ、コガタノゲンゴロウなどが生息しており、多様性に対する影響を調査するという意味において拠点フィールドを全国に展開する本計画の意義は大いにあると考えられた。トンボ類においても、熱帯地方から毎年ウシカ類のように飛来し、水田で増殖するウスバキトンボは、西南地域ではトンボ類の優占種となっており、東北、北海道では既知のように本種は希少種であり、調査中見かけることはなかった。

本研究のように現地の生産圃場を野外実験として使用させていただく場合には、実際、地域のニーズとして、防除対象病害虫の多様性、農薬生態リスクへの意識、基礎研究に対する理解といった三点がうまく揃うかどうかによって、野外実験調査の体制づくりの成否は決まる。農薬類の水田生物多様性の影響評価を現地の水田で行う場合には、通常の防除試験とは基本的に異質な合意形成を現場の地域社会に形成しなければならない。とくに長い年月の影響評価研究を目的にする場合は大変な困難を乗り越えなければならないであろう。今回、本研究事業に対する多くの賛同者と協力者のおかげで、少なくとも5年程度の中・長期的な野外影響評価実験を全国規模で行う準備はできたと考えらえる。



図(3)-7 3つの拠点における採集種数

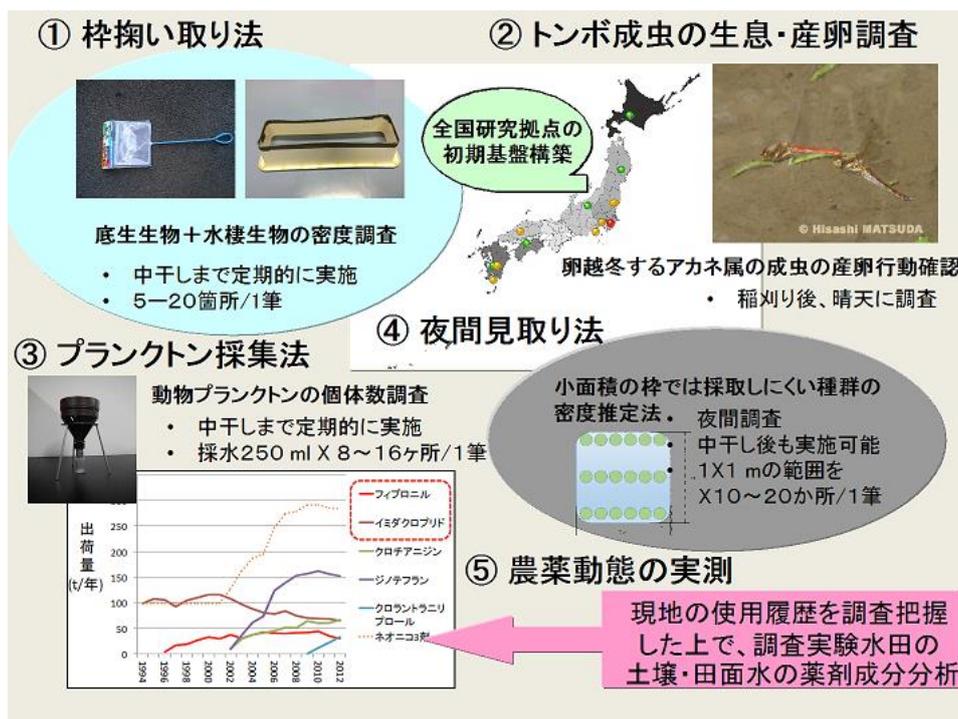
### (3) 農村フィールド影響評価法の開発

初年度は、まずオーソドックスなコドラート法に準じ、枠すくい取り法を新規開発した。さらに次年度からは、野外観察に基づいて、新たに夜間に簡便な道具類で平方の面積枠を設定する見取り調査法を試行し、最終年度は様々な手法を相互補完的に併用する総合的な野外調査サンプリング手法を採用することにした(図(3)-8)。その理由は、以下に内容の詳細を述べる初年度に考案した諸手法では、サンプリング上・作業上(特に野外での利便性)において効率性に限界があったためである。

#### 【平成25年度業務】

初年度は、まず枠すくい取り法について詳細な試行錯誤を行った。面積当たりのサンプリング法として、簡易なプラスチックの枠(180.0 x 58.5 mm)と掬い取り網(440.0 x 170.0 mm、網目1 mm以下)(図(3)-8)を用い、底生生物、水棲生物の採取を行った。本手法では、長方形型の枠を水田に土壌にはめこみ、丁度枠の短径とほぼ同じ幅の市販の掬い取り網(1mメッシュ)で追い込む様を一網打尽にするように水生動物を採集でき、微小な種群やユスリカや多様な分類群の幼虫類も採集・密度を推定する利点がある。本手法の利点は、面積当たりの種の密度を比較的精密に推定できることにある。このような精密さの利点の一方で、本手法は、1サンプルの採取個体数のバラツキや種ごとの採集頻度は決して高くはない欠点があり、それは採集の効率上、枠の面積を大きくとれないためである。本手法の面積的に狭いコドラートでは広い実際の水田のごく一部の面積しか調査できないため、見逃す種群が増える可能性が高いと予想される。ある種の採集個体数が0の場合が多い、または個体数の数値の離散性が強いなどの場合には、定量的かつ推定精度の高い統計解析を行うことが困難となるため、よりカウント効率の優れた調査手法が望まれることが予想された。

またサンプリングの時系列で解析した場合、水田で中干しが入るような愛媛県での栽培型では、



図(3)-8 野外水田の影響評価手法の開発と全国展開

中干し後も間断灌漑で水田は湛水状態になることもあるが、ほとんどのサンプルと多様な分類群は中干し前の時・空間的に安定した水田状態の時にその殆どが採集されていた。このことから、今回調査法に提案した杓内掬いとり法は、中干しが行われる時期に適宜な回数行う必要があると考えられた。しかし、種群によっては、フェノロジーを考慮すると水田での発生が8月以降に密度ピークを迎える種があるため、中干し前の調査だけでは農薬影響の判断ができないと考えられた場合には、中干し後でも湛水状態を見計らって調査する判断も妥当であると考えられた。

#### 【平成26年度業務】

生物サンプルの構成分類群ごとの内訳について精査したところ、以下ようになった。瀬戸内拠点で例に示すと、昆虫綱が44.7%を占め、動物プランクトンであるカイアシ類が、全体の29.1%と22.2%を占め、続いて腹足綱22.1%を占め、あとは多様な分類群が少ない割合で続いた。昆虫綱は比較的系統分類学が進んでいる分野でもあり、種同定は進む傾向にあるが、属や科までの同定でとどまっているものが含まれる。次に多いカイアシ類については、種同定は作業が煩雑、困難であり、系統分類学が発展途上であり、種同定作業は現状では困難を極めるが、とりあえずは採集した生物サンプルは採集場所、日時が分かるように記載ラベルを付与し、適宜エタノールなどの浸漬標本として保存し、必要上に応じて種同定に供試できるようにした。後に述べるトンボ類の幼虫の餌として重要であるプランクトン類はあくまでの種としてではなく、複数の種が混ざった分類群として取り扱うことにした。

以上より、杓すくい取り法による労力を全国に配分した場合に、全国で同時進行する野外水田栽培に応じて、一斉調査を行うことには限界が見えた。そこで、新たな簡便効率的な採集・密度

推定手法を導入する必要があり、夜間見取り法とプランクトン調査については専用の採取器（図(3)-8）を用いてプランクトンのみを別途採取する調査を平成26年度は新規採用した。

また、H26年度から夜間見取り法を新たに採用した。その理由は、今回本研究において影響評価の対象とした水中の生物種群の場合に、昼間は様々な物陰に身を隠し、泥中に隠蔽する種や個体が多く、これを直接見取りするのは困難であるためである。とくに水生甲虫やヤゴ類等は、夜行性の種が含まれ、夜間では直接見取りによる視認、採集、計数が容易に可能であった。夜間見取りについては、水面や水中に生息していて、アメンボなど動きが早いものや、ガムシのように密度が極端に低くてコドラートでは捕獲されにくいものを記録するために開発したが、今回は大型種については個体標識を行い、重複カウントを避ける工夫も加えた。この手法では、生物の動きが活発になる夜間（天候などの諸所の野外条件などにより、20～26時の間）に調査を行い、イネ株間の距離を基に1 × 1 mの区画を設定し、コドラート内の生物種群を逐一記録した。コドラート法と夜間見取りは、すくい取り法と平行して同時期の調査を行うことによって、サンプリング効率の相互補完ができ、より多くの種群の密度推定のモニタリングが可能になると考えられた。プランクトン調査については専用の採取器を用いることで、枠すくい取り法で得られた煩雑な有機物残渣から微小な動物プランクトンをソーティングする労力を省く意図して、まずは瀬戸内拠点の各水田で試験運用した。

#### 【平成27年度業務】

初年度から継続してきた枠すくいとり法は、基本調査手法として最終年度も継続できる範囲で実施した。本手法は採集したものに異物が多く混入し、ソーティングや種同定の作業上、多大な時間と労力を本年度も要した。そこで、効率的なサンプリングと影響評価を行うために、すくいとりで目立つ種群は、そのままエタノール溶液に固定しながら計数するようにし、全国で調査する場合の手法の利便性についても最終年度に当たっては新たな修正を加えることにした。以上、夜間見取りと枠すくい取りの二つの対照的な利点・欠点から、1サンプルの面積が平方と広く、作業効率の良い見取り法による調査も同時に併用すると、相互補完的にサンプリングの効率が上昇すると考え、最終年度としての調査手法の最終到達点とした（図(3)-8）。

プランクトン調査については専用の採取器（図(3)-8）を用いてプランクトンのみを別途採取する調査を昨年度から行ってきたが、本年度の全国調査においては地域特有のサンプリング上の問題点が生じることが新たに明らかとなった。例えば、水田の土質や藻類の繁茂状態によっては本装置では頻繁に濾過作業ができないことが、瀬戸内拠点の一部や東日本以北で起こり、全国規模での適用は困難であった。本手法は、海域や湖沼などの湛水域で行われるサンプリング手法を水田に応用したものであるが、ろ過の性能上どこでも使用できるサンプリング手法ではなく、瀬戸内拠点では枠採集法と併用しながら調査を継続した。平成27年度は、全国で多様なサンプリング手法による調査を進めたが、実際に採集できたサンプル数はコドラート法だけでも、莫大な数のぼった。

#### (4) 生物群集組成および薬剤濃度の調査

サブチーム1のメソコズム実験系では、今回の施用殺虫剤の連用3年間の中で、トンボ類の幼虫ヤゴ類に多大な負のインパクトが作用することが明らかになった。すでに前の結果で指摘されたように、水田メソコズムにおけるトンボ類の種は、実際の水田の種類とは必ずしも一致しないため、野外における三年連用の影響評価を行う意義は大きい。そこで、メソコズム実験系と同様、水田生物群集と薬剤濃度の動態の関係を三年間にわたり追跡することができたので報告する。

平成25年度より、とくに瀬戸内拠点のうちの愛媛県の主要な水田地帯で調査を進めたが、ある3箇所の中の1地域2集落において、図(3)-9に示したような野外実験系を一筆ごとの農薬の種類を変えることで設営することに成功し、そのまま3年間にわたりサブチーム1の水田メソコズムと同様の実験系による影響評価を実施することができた。ここでは、すべての調査手法を総動員した綿密な生物群集の調査を継続して行ってきたが、薬剤成分の動態についても、施用した殺虫成分と履歴や周辺の慣行農薬を調べた上で分析成分を特定化した計測を進める機会を得たので報告する。

#### 拠点フィールドでの野外実験区の設営

拠点フィールドの野外実験区設定状況の一例

大規模な圃場整備事業は行われていない後背湿地タイプの水田地帯



#### 隣接圃場に異なる苗箱剤を処理

図(3)-9 純農村地帯の中の野外水田実験系

開始2年目の平成26年度までは、両地域とも対照区と他の薬剤処理区間で、生物群集組成や特定種群の密度動態にとりわけ明瞭な差異は認められなかった。しかしながら、各種薬剤を3年連用した平成27年度では、2つの地域ともフィプロニル区ではトンボ類のヤゴ類の密度は調査上皆無となり、水田メソコズムと同様のフィプロニル連用処理によると思われるトンボ類への負のインパクトが認められた。野外実験を行った2地域におけるトンボ類の種組成は、水田メソコズムと同じなのはシオカラトンボのみであり、2地域の現地水田ではウスバキトンボ、ナツアカネ、アキアカネ、マユタテアカネ、アオモンイトトンボ、カトリヤンマ、ギンヤンマの発生が3年間を

通して確認されているが、3年目のフィプロニル連用水田ではヤゴ類の生息が粹すくい取り、ならびに夜間見取り法の両方に手法においても確認できなかった。フィプロニルおよび他の薬剤のインパクトについて、他の種群についても対照区との密度差異の検討を行ったが、ミジンコ類などヤゴ類の餌となる種群の密度に薬剤の負のインパクトは認められなかった。さらに加えて、それぞれの処理区について、田面水中と土壌中の薬剤成分濃度について調べた（図(3)-10）。

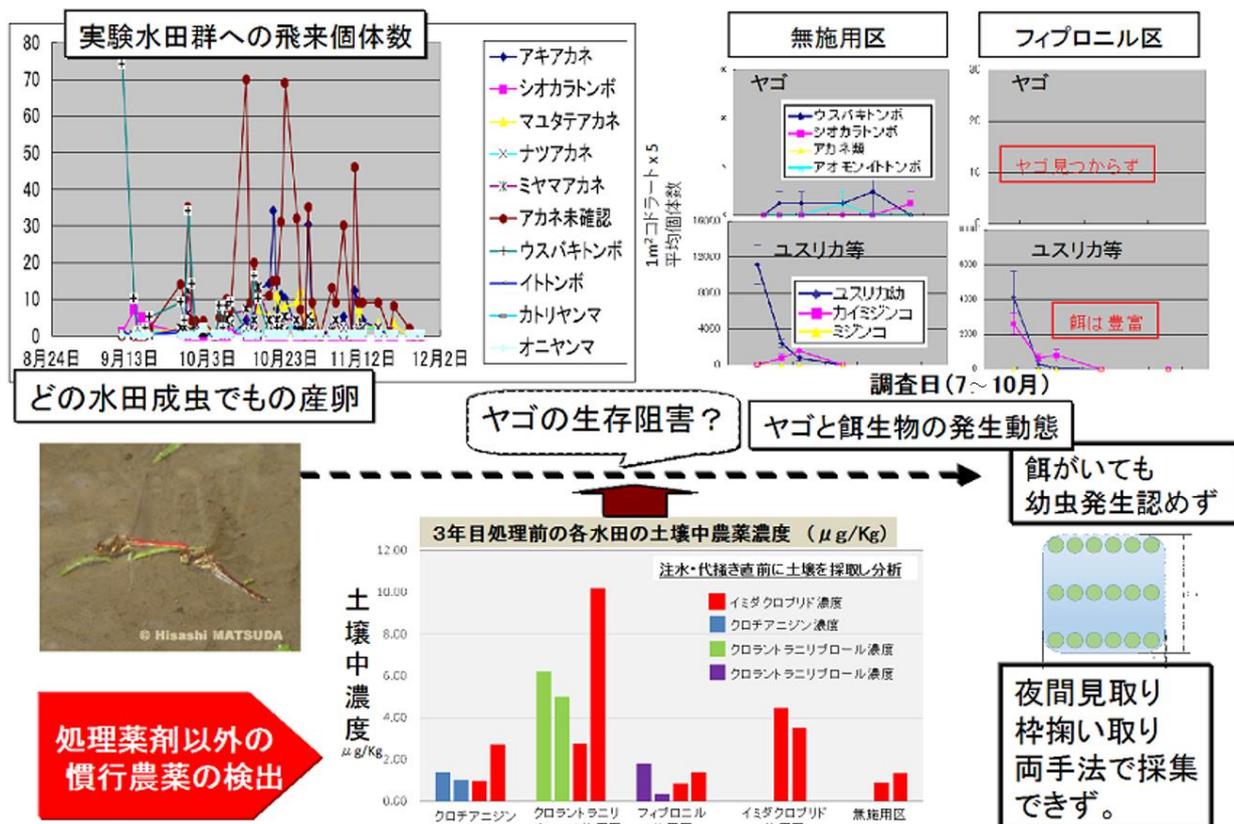
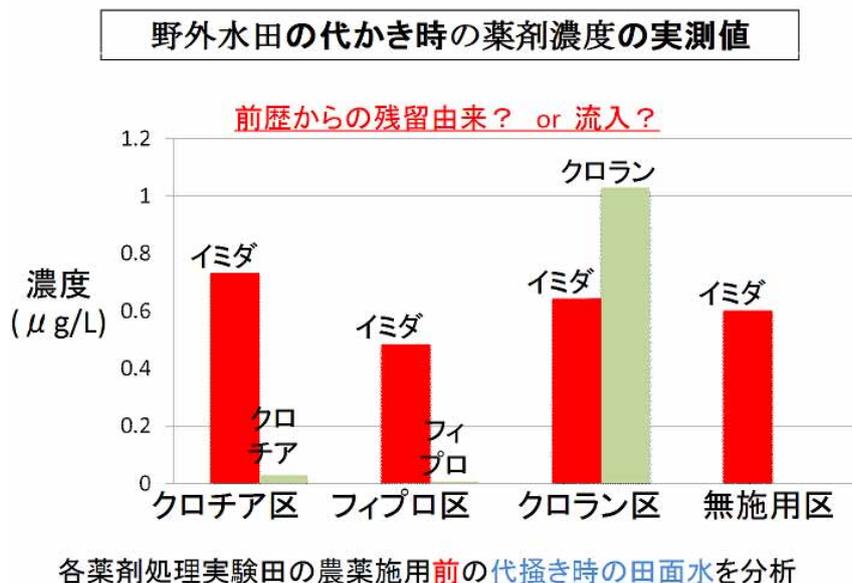


図5 野外水田におけるアカネ属の孵化時における薬剤成分濃度とヤゴ類と餌生物群集、およびトンボ類成虫の生息・産卵状況 (H27年度)

図(3)-10 野外水田におけるアカネ属の孵化時における薬剤成分濃度とヤゴ類と餌生物群集、およびトンボ類成虫の生息・産卵状況 (H27年度)

さらに、念のために2地域の慣行苗箱農薬の主殺虫成分として10年間は連用されてきているイミダクリプリドについても、薬剤処理前の注水代掻き時の土壌や田面水実測濃度を調べたところ、どの水田でもイミダクロプリドの濃度が処理水田と同等のオーダーで検出された（図(3)-11）。



図(3)-11 代掻き時の水田における薬剤濃度（薬剤名は略記）

以上から、野外水田における農薬の影響は、単に連用した薬剤成分の生物群へのインパクトだけではなく、残留か流入かは現在不明であるが、その水田地帯の履歴として使用されてきた薬剤のインパクトも加わり、水田生物多様性に影響を与えているという農薬影響の実態が初めて明らかとなった。水田メソコズムの実験結果は、単一の薬剤成分の影響を評価しているが、農村の現地で同様の薬剤の影響評価実験を行う場合には、複合的な薬剤成分の影響を考慮しないと、たとえ無処理区を3年間継続した今回のような場合でも難しい。この新たな現地の実水田における複合的な農薬汚染の実態やそのメカニズムの解明は、今後の多方面からの研究がさらに必要であり、今後も水田メソコズムや農薬の環境動態に関する諸研究と合わせた研究体制がさらに必要になると考えられる。

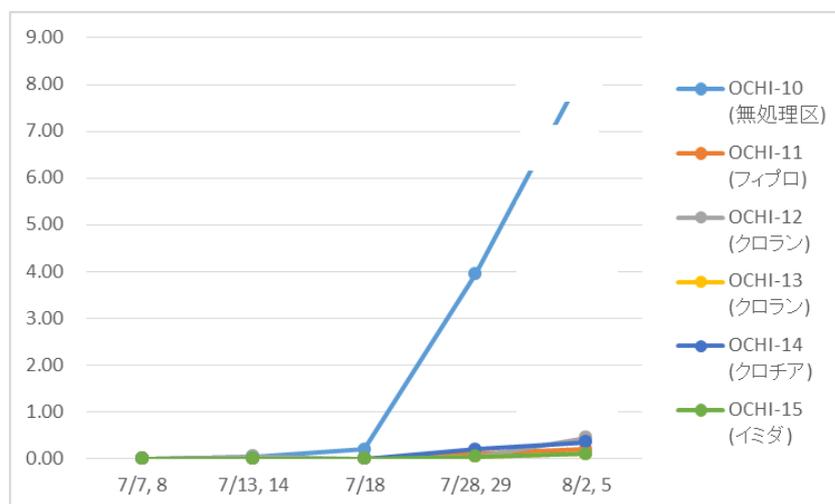
#### (5) 野外水田における影響評価指標種の選定

影響評価の方法には大別して二つあり、群集動態を組成として追跡する方法と、群集を構成する個別の種群8個体群や分類群ユニットに着目し、個体群と環境の関連性や生物間の相互作用に着目してモニタリングする方法がある。前者について、当初は検討を行ったが、無処理の対照区に比べて薬剤区が群集組成に影響を与えているようには認められなかった。生物相全体では処理区間で明確な差は認められにくく、サンプリングとソーティングならびに分類同定の多大な労力投入も考慮すると、群集組成を影響評価手法に採用するには、とくに煩雑さが伴う野外水田評価には不向きであると判断された。そのため、サブテーマ1、4の結果をも踏まえながら、指標種候補を絞り込む調査・解析方法にシフトすることにした。その効果は、すでに上記のトンボ類へのフィプロニルの影響評価で成果を見せている。

前出の代掻き時のイミダクロプリドに示された薬剤成分の高い濃度（図(3)-11）と、その後に続く施用農薬各成分の濃度の高まりを考えた場合に、田面水や土壌表層に生息する生物類は高濃

度のこれらの殺虫成分に暴露されると予想される。このような生物への農薬の暴露プロセスを考えた場合に、サブテーマ1でも議論されているような特定の薬剤に高い感受性を有する個体群は、大きい負のインパクトをおお可能性がある。水田生物群集の水田へのコロナイゼーションも水田における生活史の多様性とも呼ぶべき生物多様性を維持する主要な要因であり、代掻き直後や薬剤処理を伴う移植直後に本田に移住あるいは水田そのものから発生する種なども存在する。前者には、トンボ類で成虫が春から初夏に水田の田面水に産卵を行う種群や、ため池などの恒常的水域から移住してくる種群が想定される<sup>1)</sup>。また、トンボ類の中には、前年の秋に水田に産卵し卵越冬したまま、翌年水田に注水が始まると孵化し稚で初期の水田で発生する年一化の種類で、アキアカネやナツアカネなどもよく知られている。実際に、栽培初期の実水田におけるこれらの種群に着目して、どのような個体群の推移が認められるかについて検討を行ってみたところ、前述のアカネ属以外にも、マツモムシ、コマツモムシといった水生昆虫の仲間、無処理の対照区に比べ密度の低減現象が認められている（図(3)-12）。

指標種としては、広域に移動しながら水田に産卵し、水田注水後に発生するトンボ類やコマツモムシ、マツモムシといった半翅目が苗箱農薬指標種の候補としてあげられた。このような農薬影響評価の指標候補種についての結果のうち半翅目については、Watanabe *et al.* (2013)<sup>4)</sup>と小路ら (2015)<sup>5)</sup>が今回の研究調査拠点の一つの候補である北陸の奥能登地域で行った傾向とも類似した点もあった。また農村現地における野外水田の調査結果から、農薬の水田生物多様性への影響評価を行う場合には、必ず事前の農薬利用履歴を個別生産者スケールから農村地域スケールで調べ、使用薬剤の連用にも気を配ることは忘れてはならない。



図(3)-12 各処理区におけるコマツモムシの密度推移

### 【3年間の研究成果のまとめ】

#### 1) 水田での苗箱使用殺虫剤の実態把握調査

今回実験に供試した殺虫剤成分、フィプロニル、クロラントリニリプロール、クロチアニジンにイミダクロプリドを加えた薬剤が苗箱農薬の主成分として全国の水稲栽培で使用されているこ

と、そして、どの薬剤成分を使用するかは、地域や生産農家の病害虫防除の意思決定などによって多様性があることが認められた。

## 2) 全国調査体制の構築と農村フィールド影響評価法の開発

平成25年度は、瀬戸内拠点として愛媛県内3か所、広島県内1か所の野外実験系を現地設置しながら、影響評価手法の試行錯誤を進め、各種生物の密度が推定できる枠すくい取り法を提案し生物群集組成の調査を行った。その結果、愛媛県内3か所の水田から60種前後が採集でき、時系列の生物群集の動態から影響評価のための調査は、移植後1か月内外の期間を中心に行う妥当性が見出された。平成26年度以降は、研究拠点でより簡便で効率的で全国一斉調査に資することのできる実地的な調査手法を確立し、その傍らで、関東、北陸、南九州、最終年度には東北・北海道を加えた全国調査の初期研究基盤をつくった。

これらの全国調査から、各地域ごとの生物群集の種組成に多様性が認められることと、その一方で全国の野外水田に共通する出現種には、ナツアカネなどのアカネ属などが示された。各地域ごとに使用されている苗箱農薬の種類が多様性と生物種の多様性の複雑な関係性が予想された。

## 3) 野外水田の生物群集と薬剤濃度の関係性

サブチーム1の水田メソコズムと同様の、3年間の各種薬剤連用実験は、瀬戸内拠点の2地域の水田地帯で行うことができた。開始2年目の平成26年度までは、両地域とも対照区と他の薬剤処理区間で、生物群集組成や特定種群の密度動態にとりわけ明瞭な差異は認められなかった。しかしながら、各種薬剤を3年連用した平成27年度では、2つの地域ともフィプロニル区ではトンボ類のヤゴ類の密度は調査上ゼロとなり、水田メソコズムと同様のフィプロニル連用処理によると思われるトンボ類への負のインパクトが認められた。野外実験を行った2地域におけるトンボ類の種組成は、水田メソコズムと同じなのはシオカラトンボのみであり、2地域の現地水田では、ウスバキトンボ、ナツアカネ、アキアカネ、マユタテアハネ、アオモンイトトンボ、カトリヤンマ、ギンヤンマの発生が3年間を通して確認されているが、3年目のフィプロニル連用水田ではヤゴ類の生息が枠すくい取り、ならびに夜間見取り法においても確認できなかった。フィプロニルおよび他の薬剤のインパクトについて、他の種群についても対照区との密度差異の検討を行ったが、ミジンコ類などヤゴ類の餌となる種群の密度に薬剤の負のインパクトは認められなかった。

さらにそれぞれの処理区について、田面水中と土壌中の薬剤成分濃度について調べた。サブチーム1、2での水田濃度予測と同様、各実験水田の実測値は連用によって高まる傾向にあり、とくにヤゴ類に負のインパクトを与えたフィプロニルの場合には、代掻き時、移植直後から1か月の土壌中濃度は、年々高まる傾向にあり、サブチーム1で得られた結果が野外水田でも再現されたと示唆された。さらに、念のために2地域の慣行苗箱農薬の主殺虫成分として10年間は連用されてきているイミダクリプリドについても、注水代掻き前や代掻き後薬剤処理前の土壌や田面水実測濃度を調べたところ、どの水田でもイミダクロプリドの濃度が処理水田と同等のオーダーで検出された。以上から、野外水田における農薬の影響は、単に連用した薬剤成分の生物群へのインパクトだけではなく、残留か流入かは現在不明であるが、その水田地帯の履歴として使用されてきた薬剤のインパクトも加わり、水田生物多様性に影響を与えているという新しい農薬影響の実態が初めて明らかとなった。

今回の農村現地における野外水田の調査結果から、農薬の水田生物多様性への影響評価を行う場合には、必ず事前の農薬利用履歴を個別生産者スケールから農村地域スケールで調べ、使用薬剤の連用にも気を配ることが重要であることが示された。また、指標種としては広域に移動しながら水田に産卵し、水田注水後に発生するトンボ類やコマツモムシ、マツモムシといった半翅目が苗箱農薬指標種の候補としてあげられた。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

野外水田における農薬の影響は、単に連用した薬剤成分の生物群へのインパクトだけではなく、残留か流入かは現在不明であるが、その水田地帯の履歴として使用されてきた薬剤のインパクトも加わり、水田生物多様性に影響を与えているという新しい農薬影響の実態が初めて明らかとなった。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

特に記載すべき事項はない。

## 6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文（査読あり）>

- 1) 小路晋作、伊藤浩二、日鷹一雅、中村浩二：日本生態学会誌、65 (3)：279-290 (2015)  
「省力型農法としての「不耕起V溝直播農法」が水田の節足動物と植物の多様性に及ぼす影響」

#### <その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

### (2) 口頭発表（学会等）

- 1) 日鷹一雅：第61回日本生態学会大会、企画集会T08 ネオニコチノイド系農薬と生物多様性：何がどこまで分かっているか？ 今後の課題は何か？ (2015) 「水田における農生物多様性とネオニコチノイド系農薬：影響指標を求めて」 企画者：林岳彦 第61回日本生態学会大会、鹿児島、3月20日
- 2) 日鷹一雅：国立環境研究所公開シンポジウム「ネオニコチノイド系農薬と生物多様性～何がどこまで分かっているか？ 今後の課題は何か？」 (2015) 「ネオニコチノイド系農薬の水

田生物多様性影響の実態」． 大山ホール国立環境研 7月15日

- 3) 日鷹一雅：第63回日本生態学会（2016）「里地の減る種・増える種・変わらない種：発生変動の逆問題を解くには？」

### （3）出願特許

特に記載すべき事項はない。

### （4）「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

### （5）マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

### （6）その他

特に記載すべき事項はない。

## 8. 引用文献

- 1) 日鷹一雅. 1998. 水田における生物多様性保全と環境修復型農法. 日本生態学会誌 第48 巻 第2号 : 167-178.
- 2) 日鷹一雅. 嶺田拓也・大澤啓志 2008 水田生物多様性の成因に関する総合的考察と自然再生ストラテジ、農村計画学会誌、27 巻 : 20-25
- 3) 日鷹一雅. 2010 農生態系における生物多様性保全. 自然再生ハンドブック 日本生態学会生態管理全国委員会編 173-180
- 4) Watanabe K, Koji S, Hidaka K, Nakamura K (2013) Abundance, diversity and seasonal population dynamics of aquatic Coleoptera and Heteroptera in rice fields of direct seeding management. *Environ. Entomol.* 42(5):841-850
- 5) 小路晋作、伊藤浩二、日鷹一雅、中村浩二 2015 省力型農法としての「不耕起V溝直播農法」が水田の節足動物と植物の多様性に及ぼす影響. : 日本生態学会誌 第65巻 第3号:279-290

#### (4) 水田生物多様性の影響評価システムの開発

国立研究開発法人国立環境研究所

環境リスク研究センター 環境リスク研究推進室 林 岳彦

平成25～27年度累計予算額：6,898千円（うち平成27年度：2,271千円）

予算額は、間接経費を含む。

##### [要旨]

本サブテーマは本研究課題の統括として、サブテーマ1～3からの知見を集約し、水田生物多様性の総合的影響評価システムの開発を行った。具体的には、サブテーマ1からの複数年にわたる水田メソコズム試験データの多変量解析を行い、各薬剤の群集に対する影響の基本的な特徴を抽出した。そして、群集における個々の生物種の増減データを集約し、影響評価における指標種候補の抽出を行った。さらに、生物種の生態学的特性や重要性、およびサブテーマ3からの野外の実圃場からの実験・観察データの情報と照らし合わせることにより、地域における指標種候補の決定を行った。また、各薬剤の影響を半定量的に評価するためのスコアリング法を開発し、地域ごとのリスク評価を行った。最後に、施用シナリオごとのリスク予測とリスク削減のための施策の方向性の提言を行った。総合的なリスク評価の結果、現時点でもっともリスクが懸念される薬剤としてフィプロニルが挙げられた。

##### [キーワード]

リスク評価、影響評価、曝露評価、総合評価、リスク管理

#### 1. はじめに

現在、ネオニコチノイド系農薬等が水田生物多様性に与える影響が懸念されている。その一方で、農薬の水田生物多様性への影響の評価方法は殆ど確立していない。現状の農薬の水生生物に対する影響の評価法は、藻類・甲殻類（オオミジンコ等）・魚類に対する室内毒性影響試験から得られる毒性値データに基づいた簡易的なものに留まっている。この評価方法は農薬登録時の行政的な評価方法としては一定の意義を持つものである。しかしながら、実際に特定の農薬（例：ネオニコチノイド系農薬）について特定の状況（例：水田圃場）で特定の生態系（例：地域Aにおける主要トンボ類を含む水田生態系）に対する現実的な懸念が存在する場合に、上記のような（曝露環境の面でも試験生物の面でも）水田生態系との関連性に乏しい室内毒性試験の結果から実際の水田生態系における影響を評価することには明らかな限界がある。そのため、現在水田で広く用いられているネオニコチノイド系農薬等による水田生物多様性への影響評価を行うためには、より実際の水田圃場に近い生物群集や生態系を用いた影響評価や曝露評価に基づいた、農薬の影響をより総合的に評価するためのシステムの開発が必要である。

## 2. 研究開発目的

本サブテーマの主な目的は、本研究課題の統括としてサブテーマ1～3からの知見を集約し、水田生物多様性の総合的影響評価システムの開発を行うことである。具体的な目標は、(1)他サブテーマのデータから薬剤ごとの影響の特性をまとめ指標候補となる生物種を決定する、(2)決定した指標候補種に基づく水田生態系への影響評価法を開発する、(3)開発した評価法を用いて現状の知見から各薬剤に対するリスク評価を行いリスク管理施策の方向性を提言する、である。

## 3. 研究開発方法

サブテーマ1の水田メソコズムデータに基づく各薬剤の指標種候補の抽出においては、以下の手法を用いた。

### (1) 諸要因が生物群集組成に与える影響の主成分分析による解析

水田メソコズムデータにおける各圃場区画における群集組成は、農薬の施用だけではなく、実験操作では統制しきれない偶発的な変動の影響も強く受けている。特に、それぞれの年による環境要因の違いは人為的な統制の困難な要因である。実際に、複数年データの予備的な整理からは薬剤の無施用区（対照区）であっても年度ごとに群集組成が大きく異なる傾向が示唆された。そのため、薬剤の影響とその他の要因の複数の影響の大きさを同時かつ定量的に把握するために、薬剤以外の諸要因による影響を視野に含めた多変量解析を行う必要があった。本解析では、本推進費で得られた2013-2015年度の水田メソコズムおよび既往（2011-2012年度）の水田メソコズムの群集組成データに対して主成分分析を行い、各圃場区画において群集組成がどのような要因（薬剤、年の違い等）と関連を持つかを分析した。解析の際の群集組成データとしては、各圃場区画における各生物種の年間総カウント数を用いた（つまり、各圃場区画による群集組成は構成生物種のカウント数を要素としたベクトルとして表現され主成分分析が行われた）。カウント数は指数的な変動およびバラツキを持つため、対数変換( $\ln(10 \times \text{カウント数} + 1)$ )された後に解析された。

### (2) 個々の生物種における相対変化率の算出

水田メソコズムデータからの指標種候補の抽出のために、2013-2015年の水田メソコズムデータおよび既往の水田メソコズムデータから、生物種ごとの相対変化率の集計を行った。相対変化率の集計は、各圃場の生物種別のカウントデータを基に、「年×薬剤×種」の組み合わせごとに行った（同一条件に対して2反復の試験設計のため、同条件で2つの値が算出される）。ここで、「相対変化率」は次の式により算出された：

$$\begin{aligned} & \text{相対変化率} \\ & = \frac{(\text{薬剤処理圃場における年間カウント数} - \text{対照区における年間カウント数})}{(\text{対照区における年間カウント数})} \end{aligned}$$

上記の相対変化率が低い（＝負の変化率が大きい）ことを指標種候補の選択における一つの条件として考慮した。尚、相対変化率等の算出においては（主成分分析で行ったように）個体数を対

数変換したのちに重回帰分析を行う等の統計学的方法もありうるが、年度によるサンプル間変動や生態学的な考察を踏まえた上で圃場ごとの各生物と各薬剤の反応をより仔細に吟味するために、対数変換を行わず上記のような比較的単純な方法を採用した。

また、「方法」に属するものではあるが、その方法論自体の開発が目的となっている事項（スコアリング方法など）に関しては、本項ではなく「結果及び考察」の項にその開発における論拠とともに記載した。

#### 4. 結果及び考察

##### (1) 各殺虫剤およびその他要因が生物群集組成に与える影響の解析

###### 1) 水田メソコズム実験からの群集組成データに対する主成分プロットによる分析

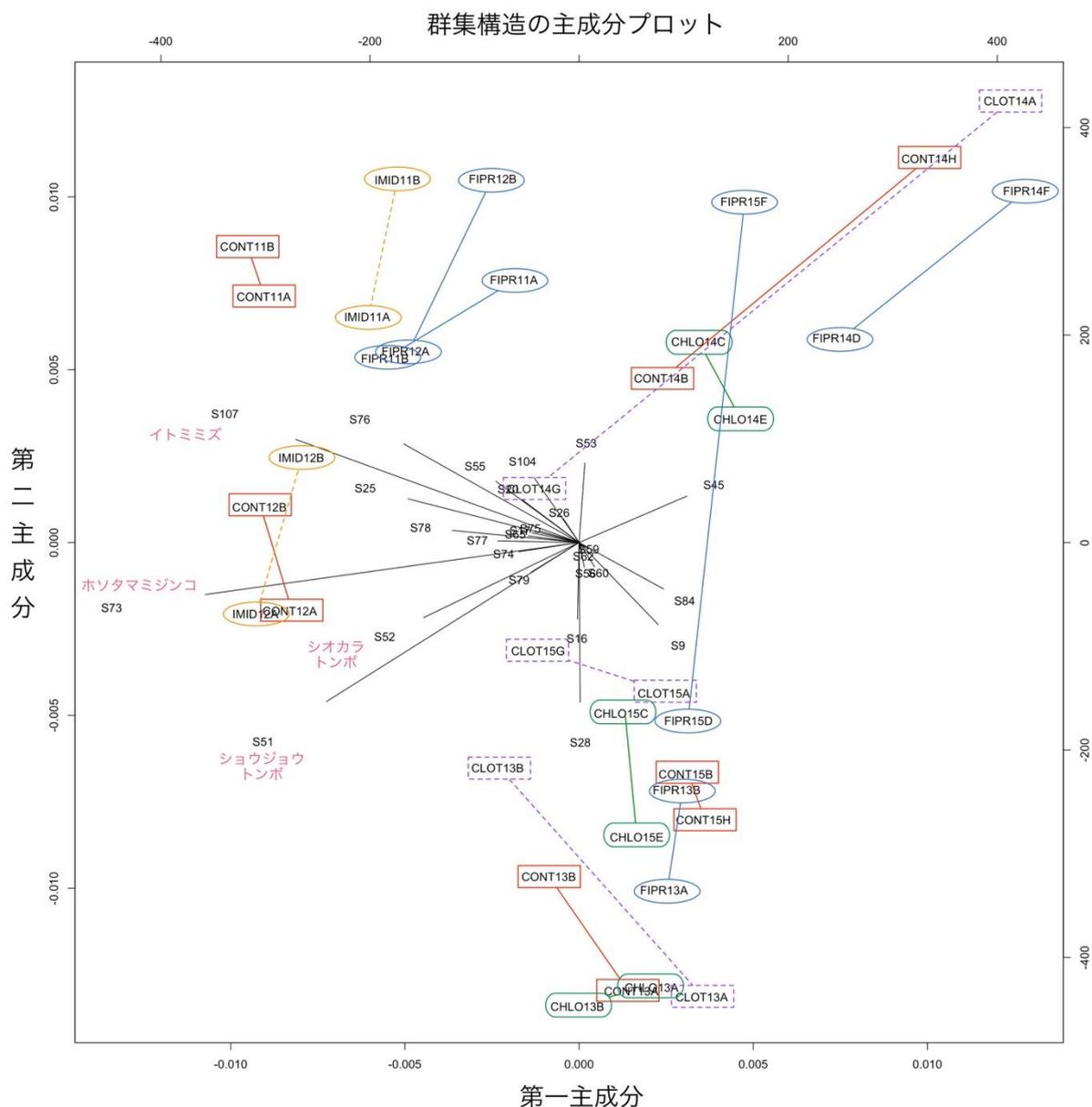
各圃場区画における群集組成を主成分プロットしたところ、各圃場における群集組成は、薬剤の施用による違いよりも年ごとの違いに大きく依存していることが示された(図(4)-1)。例えば、開始年度となる2011年のデータは、対照群 (CONT11A, B) ・イミダクロプリド施用群 (IMID11A, B) ・フィプロニル施用群 (FIPR11A, B) の全てが主成分プロット上の左上側に位置している。同じ年の群集組成が近い傾向については2012年以降においても同様であり、2012年のデータは主成分プロット上の左から左上側、2013年と2015年のデータは主成分プロットの中央下側、2014年のデータは右上側に集中して位置する傾向が見られた。これは、薬剤の施用条件に関わらず、同じ年に各圃場でみられた群集組成は相対的に類似していることを示している。

このことは、これらの水田メソコズム実験系が開放系であり、各圃場区画における群集組成の基本形が主に外部からの移入によって決定されていることを素直に反映しているものと考えられる。外部からの移入元となる群集 (国立環境研究所敷地内および敷地外の周辺生態系) はもちろん全ての圃場で共通であり、また、年によって移入元となる群集の状況は異なってくる。例えば、2014年の群集組成は主成分プロットの右上側にやや離れた特徴的な位置を占めている (図(4)-1)。これは、国立環境研究所内の池の池干しという2014年にのみに生じたイベントにより、2014年のショウジョウトンボやシオカラトンボの実験圃場への移入量が減少したことを反映したものである可能性が高い。これらの結果は、水田生物群集の基本的な組成は、より広い範囲の周辺生態系の状況やイベントを強く反映しうることを示すものである。

上記の結果は、薬剤の施用が水田生物群集へ与える影響を見るためには、単年の調査では年ごとの変動と薬剤の変動を見分けることが困難であり、薬剤の影響を明らかにするためには本研究課題で実施したような複数年にわたる調査が必要であることを意味するものである。

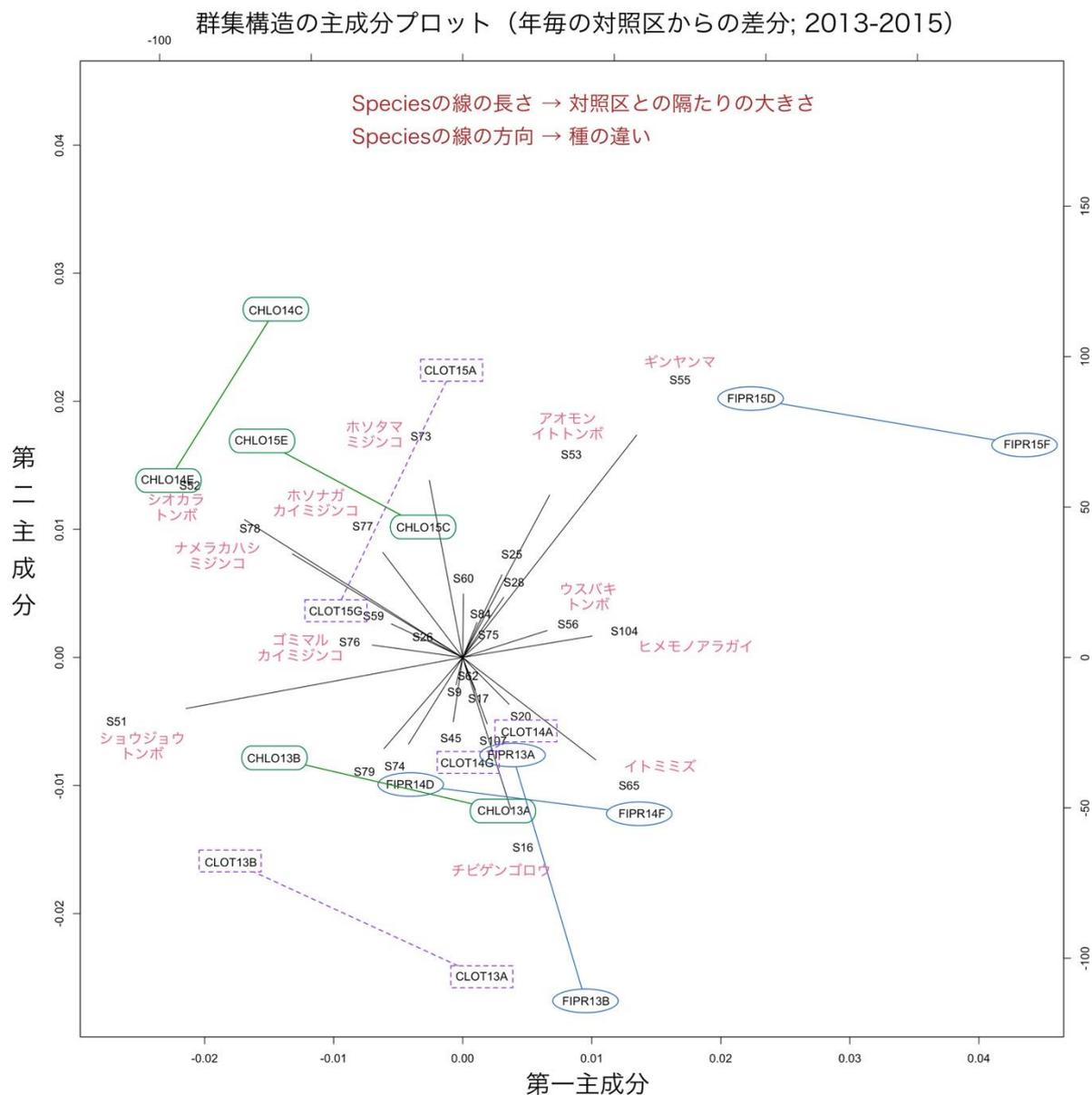
###### 2) 水田メソコズム実験からの「対応する年の対照区画との群集組成の差分データ」に対する主成分プロットによる分析

図(4)-1の主成分プロットでは、主成分軸における年による違いが大きく、薬剤による影響の違いが不明瞭であった。そのため、年による違いの影響を補正するために、群集組成の要素である各生物種のカウント数について、それぞれの年の対照区と薬剤施用区とのカウント数の差分



図(4)-1 水田メソコズムデータにおける各群集の種組成の主成分プロット

CONTXXA, B : 20XX 年の対照区の群集 (XX は実験の実施年を表す 11, 12, 13, 14, 15 のいずれかの数値が入る。A, B は同一条件による処理区の反復を表す。以下についても同様)、IMIDXXA, B : 20XX 年のイミダクロプリド施用区の群集、FIPRXXA, B : 20XX 年のフィプロニル施用区 A, B の群集、CLOTXXA, B : 20XX 年のクロチアニジン施用区の群集、CHLOXXA, B : 20XX 年のクロラントラニプリロールの施用区 A, B の群集。第一・第二主成分に対する貢献度 (主成分スコア) の高い種については図中に種名を付記した。主成分プロットにおいてある群集 Z とある種 Y が同じ方向に位置するとき、種 Y は群集 Z の組成を特徴づける種の一つであると解釈できる。



図(4)-2 水田メソコズム実験における、対応する年の対照区と薬剤施用区との群集組成の差分データに対する主成分プロット

CONTXXA, B : 20XX 年の対照区の群集 (XX は実験の実施年を表す 11, 12, 13, 14, 15 のいずれかの数値が入る。A, B は同一条件による処理区の反復を表す。以下についても同様)、IMIDXXA, B : 20XX 年のイミダクロプリド施用区の群集、FIPRXXA, B : 20XX 年のフィプロニル施用区 A, B の群集、CLOTXXA, B : 20XX 年のクロチアニジン施用区の群集、CHLOXXA, B : 20XX 年のクロラントラニプロールの施用区 A, B の群集。第一・第二主成分に対する貢献度 (主成分スコア) の高い種については図中に種名を付記した。主成分プロットにおいてある群集 Z とある種 Y が同じ方向に位置するとき、種 Y は群集 Z の組成を特徴づける種の一つであると解釈できる。

(対数変換後に差分をとったので、常数では比をとったことに対応する) を取ることにより、年による変動の影響を補正したデータに対しての主成分プロットを作成した(図(4)-2)。図(4)-2からは、年による影響を補正したことにより、薬剤の違いによる影響がより明確に現れた。まず、主要な傾向として主成分軸1に沿って、右側にフィプロニル施用区が、左側にクロラントラニリプロール施用区が位置し、その間にクロチアニジン施用区が位置するという基本的な傾向が見られた。また、左側のクロラントラニリプロール施用区が位置する群集の特徴づけに寄与する種(第一主成分において大きな負の値の主成分スコアを持つ種)は、シオカラトンボ、ショウジョウトンボなどであることが示された。これは、クロラントラニリプロール区の群集にはそれらのトンボの個体数が相対的に多いことを示すものである。また、それらのトンボ種と逆側にはフィプロニル施用区が位置しており、フィプロニル施用区の群集ではそれらのトンボ種が総体的に少ないことが示唆される。逆に、フィプロニル施用区が位置する右上側の群集の特徴づけに寄与する種としては、ギンヤンマやアオモンイトトンボ、ウスバキトンボ、ヒメモノアラガイ、イトミミズなどが示された。これらのことは、フィプロニル施用区におけるトンボ類の減少は全ての種によって起こるのではなく、種によってはフィプロニル施用区の群集を特徴づける種となりうることを示している。フィプロニル施用区におけるギンヤンマの増加については、さらなる調査が必要であるものの、水田環境中内で競争関係となりうるショウジョウトンボやシオカラトンボが減少したことによる間接効果により増加が生じた可能性も考えられる。

図(4)-2における対照区の群集は第一・第二主成分ともに(対照区との差分データを用いているため)ゼロの位置を占める。ゼロから遠い位置を占める種ほど対照区の群集におけるカウント数との隔たりが大きい種であるため、ゼロ点から遠い位置にある種が農薬影響を調査する上での指標候補種となりうる。図(4)-2からは、そのような指標候補種として、シオカラトンボ、ショウジョウトンボ、ナメラカハシミジンコ、ギンヤンマ、チビゲンゴロウ、イトミミズ、ヒメモノアラガイ、ウスバキトンボ、アオモンイトトンボ、ホソタマミジンコ、などが挙げられる。しかしながら、これらの種の幾つかは(そもそもの個体密度が小さいこともあり)対照区におけるカウント数が安定的でないものもあり、実際に指標種とするには調査結果の安定性に不安が残るものも存在した。そのため、実際の指標種の選定にあたっては、薬剤ごとに各年の各圃場における実際の増減のデータをより仔細に見た上で選出することが望ましいと考えられた。

## (2) 総合評価に用いるための指標種の選出

サブテーマ1での水田メソコズム調査における各生物種に対する相対変化率を表(4)-1~4にまとめ、農薬影響に対する生物調査における指標種の検討と選定を以下のように行なった。

### 1) フィプロニルの影響に対する指標種候補の抽出

フィプロニル施用区ではシオカラトンボおよびショウジョウトンボのヤゴにおいて非常に強い負の影響が見られた(表(4)-1)。また、イトミミズでも多くの場合において中程度の影響が見られている。ナメラカハシミジンコ、コムズムシ、キベリヒラタガムシ、ケンミジンコ、ホソタマミジンコ、ユスリカ幼虫においても平均的には中程度の影響が見られているが、減っている年もあれば増えている年もあり、その影響は必ずしも一貫していない。これらのことから、フィプロニルの影響に対する指標種候補としては先ずシオカラトンボ、ショウジョウトンボが挙げられる。

次点としてはイトミミズが挙げられ、必ずしも影響が一貫していないものの平均的には影響がありうる種としては、ナメラカハシミジンコ、コムズムシ、キベリヒラタガムシ、ケンミジンコ、ホソタマミジンコ、ユスリカ幼虫が挙げられる。尚、トンボ類ではあるもののアオモンイトトンボに対しては平均すると正の影響が見られており、フィプロニルの影響は必ずしもトンボ類全てに強い影響を持つわけではないことが示唆された。

表(4)-1 フィプロニル施用区における種ごとの相対変化率

生物種	平均	2011年	2011年	2012年	2012年	2013年	2013年	2014年	2014年	2015年	2015年	標準偏差
シオカラトンボ若虫	-0.96	-0.93	-0.71	-1.00	-1.00	-0.91	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	0.09
ショウジョウトンボ若虫	-0.89	-1.00	-0.98	-0.95	-0.99	-0.81	-0.75	-0.47	-1.00	-0.95	-1.00	0.17
イトミミズ	-0.60	-0.29	-0.63	-0.95	-0.72	-1.00	0.03	-0.89	-1.00	-1.00	0.43	0.35
ナメラカハシミジンコ	-0.36	1.00	0.06	1.00	-1.00	-0.62	-0.97	-0.38	-0.87	-0.86	-0.99	0.76
コムズムシsp成虫	-0.30	-0.60	-0.20	0.55	1.00	-0.33	0.00	-0.96	-0.43	-1.00	-1.00	0.62
キベリヒラタガムシ成虫	-0.29	-0.58	-0.68	0.90	0.02	0.20	-0.33	-0.88	-0.92	-0.33	-0.33	0.55
ケンミジンコsp.1	-0.29	-0.62	1.00	0.37	-0.62	-0.42	0.30	-0.69	-0.79	-0.61	-0.84	0.59
ホソタマミジンコ	-0.28	-0.67	-0.48	0.78	-0.28	0.21	-0.69	-1.00	-1.00	0.32	0.00	0.59
ユスリカ幼虫	-0.21	-0.88	-0.63	1.00	-0.82	-0.65	-0.42	0.02	-0.63	0.76	0.17	0.65
ゴミマルカイミジンコ属	-0.07	-0.46	-0.36	0.93	0.25	-0.95	-0.28	0.90	-0.92	0.05	0.12	0.65
イボカイミジンコ属	0.05	-0.65	-0.03	1.00	-0.43	0.16	1.00	1.00	0.10	-0.72	-0.92	0.66
ホソナガカイミジンコ属	0.10	0.25	1.00	0.12	0.13	-0.44	1.00	0.03	-0.60	-0.52	0.03	0.56
コカゲロウspp若虫	0.11	0.79	1.00	-0.51	-0.66	-0.61	-0.43	0.18	0.40	1.00	-0.02	0.66
アオモンイトトンボ若虫	0.13	0.25	1.00	-0.82	-0.74	-0.49	-0.49	0.67	0.34	0.63	1.00	0.64
ミギワバエ幼虫	0.32	1.00	0.27	0.94	1.00	0.14	0.80	-0.73	-0.44	1.00	-0.74	0.63
チビゲンゴロウ成虫	0.39	0.57	1.00	1.00	0.68	0.71	0.71	-0.46	-0.46	1.00	-0.79	0.55
シカクカイミジンコ属	0.48	1.00	-0.70	1.00	0.00	1.00	0.20	1.00	0.08	1.00	0.16	0.60

## 2) クロチアニジンの影響に対する指標種候補の抽出

クロチアニジン施用区ではコカゲロウspp若虫に一貫した中程度の影響が見られた(表(4)-2)。また、シオカラトンボとアオモンイトトンボについては増加している場合もあるものの、多くの区で中程度の負の相対変化率が見られた。また、ナメラカハシミジンコ、ホソナガカイミジンコ、イボカイミジンコにおいても増加した場合や影響が見られない場合があるものの、中程度の影響が見られた。これらのことから、クロチアニジンの影響に対してはコカゲロウspp若虫が良い指標であると考えられる。また、次点としてはシオカラトンボ、アオモンイトトンボ、ナメラカハシミジンコ、ホソナガカイミジンコ、イボカイミジンコが指標として挙げられる。ただしこれらの影響は必ずしも一貫したものが得られているわけではないことには注意が必要である。

表(4)-2 クロチアニジン施用区における種ごとの相対変化率

生物種	平均	2013年	2013年	2014年	2014年	2015年	2015年	標準偏差
コカゲロウspp若虫	-0.48	-0.78	-0.39	-0.27	-0.73	-0.46	-0.26	0.21
シオカラトンボ若虫	-0.44	-0.73	-0.50	-1.00	-1.00	1.00	-0.43	0.68
アオモンイトトンボ若虫	-0.39	-0.85	-0.78	0.00	-0.80	0.26	-0.14	0.44
ナメラカハシミジンコ	-0.37	-0.99	-0.18	-0.61	-0.84	-0.60	1.00	0.66
ホソナガカイミジンコ属	-0.32	-0.89	0.03	-0.42	-0.64	-0.05	0.04	0.36
イボカイミジンコ属	-0.26	-0.41	0.16	-0.51	0.22	-0.67	-0.34	0.33
ショウジョウトンボ若虫	-0.22	-0.08	0.12	-1.00	1.00	-0.84	-0.50	0.67
ミギワバエ幼虫	-0.21	0.66	1.00	-0.69	-0.65	-0.72	-0.87	0.75
ホソタマシミジンコ	-0.15	-0.69	0.03	-1.00	1.00	0.18	-0.43	0.65
ユスリカ幼虫	-0.14	-0.79	-0.32	-0.06	-0.34	1.00	-0.34	0.55
シカクカイミジンコ属	-0.11	-0.21	-0.17	0.04	0.04	-0.61	0.23	0.26
チビゲンゴロウ成虫	-0.01	0.66	0.66	-1.00	1.00	-0.89	-0.47	0.81
イトミミズ	0.00	-1.00	1.00	-1.00	1.00	-1.00	1.00	1.00
コミズムシsp成虫	0.03	0.40	1.00	-0.23	-1.00	1.00	-1.00	0.84
ゴミマルカイミジンコ属	0.18	-0.80	1.00	-0.69	0.41	0.14	1.00	0.72
ケンミジンコsp.1	0.25	0.04	1.00	-0.82	1.00	-0.70	1.00	0.79
キベリヒラタガムシ成虫	0.38	1.00	-0.33	-0.40	1.00	0.00	1.00	0.63

### 3) クロラントラニリプロールの影響に対する指標種候補の抽出

クロラントラニリプロール施用区では、イトミミズに対して一貫して非常に大きい影響が見られた(表(4)-3)。ただし、イトミミズに関しては全体でのカウント数は少なく、イトミミズについては対照区でのカウント数が極端に少ない場合もあるなど、指標としての安定性に欠ける可能性がある。また、キベリヒラタガムシについては全ての区において中～高程度の負の影響が見られた。また、コミズムシ、イボカイミジンコでは一区画を除いて全て負の影響が見られている。ナメラカハシミジンコ、チビゲンゴロウ、シカクカイミジンコ、ユスリカ幼虫においては平均して中程度の影響が見られているものの、区画によっては増えている区画もあり、その影響は必ずしも一貫しているとは言えない。これらのことから、クロラントラニリプロールの影響に対する指標種候補としては、キベリヒラタガムシが挙げられる。次点としては、イトミミズ、コミズムシ、イボカイミジンコが候補になると考えられる。

表(4)-3 クロラントラニリプロール施用区における種ごとの相対変化率

生物種	平均	2013年	2013年	2014年	2014年	2015年	2015年	標準偏差
イトミミズ	-0.98	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-0.87	-1.00	0.05
キベリヒラタガムシ成虫	-0.76	-0.33	-0.78	-0.68	-0.96	-0.80	-1.00	0.22
コミズムシsp成虫	-0.60	0.20	-1.00	-0.93	-0.96	-0.71	-0.20	0.45
イボカイミジンコ属	-0.39	-0.68	0.03	-0.63	-0.38	-0.04	-0.63	0.29
ナメラカハシミジンコ	-0.39	-1.00	-0.22	-0.77	-0.21	-0.60	0.49	0.48
チビゲンゴロウ成虫	-0.34	-0.68	1.00	-1.00	-1.00	0.41	-0.79	0.77
シカクカイミジンコ属	-0.30	-0.47	-0.16	0.37	0.10	-0.80	-0.82	0.44
ユスリカ幼虫	-0.22	-0.48	-0.60	-0.58	1.00	0.06	-0.72	0.60
シオカラトンボ若虫	-0.17	-0.14	-0.77	0.21	1.00	-0.58	-0.71	0.62
ショウジョウトンボ若虫	-0.05	1.00	-0.26	-0.33	0.19	-0.33	-0.58	0.52
ホソナガカイミジンコ属	-0.03	-0.95	-0.41	1.00	0.10	-0.90	1.00	0.81
ケンミジンコsp.1	0.02	0.27	0.89	-0.72	-0.65	0.20	0.12	0.55
ミギワバエ幼虫	0.03	-0.46	0.84	1.00	-0.88	0.14	-0.45	0.69
コカゲロウspp若虫	0.08	-0.66	-0.61	0.73	1.00	0.14	-0.14	0.63
ゴミマルカイミジンコ属	0.10	-0.88	-0.13	0.44	1.00	0.38	-0.22	0.59
アオモンイトトンボ若虫	0.12	-0.85	-0.64	1.00	0.47	0.59	0.12	0.66
ホソタマミジンコ	0.26	1.00	0.62	0.10	-0.43	-0.75	1.00	0.68

#### 4) イミダクロプリドの影響に対する指標種候補の抽出

イミダクロプリド施用区では、イトミミズに対して一貫して非常に大きい影響が見られた（表(4)-4）。ただし、イトミミズについては対照区でのカウント数が極端に少ない場合もあるなど、指標としての安定性に欠ける可能性がある。また、ショウジョウトンボについても一貫した中～高程度の負の影響が見られた。シカクカイミジンコについても概ね一貫した中程度の負の影響が見られていた。コカゲロウ、イボカイミジンコについては中程度の負の影響が見られているが、区によっては増加している場合もあるなど必ずしも一貫した結果が得られているわけではない。これらのことから、イミダクロプリドに対する影響の指標としては、ショウジョウトンボが挙げられる。次点として、イトミミズ、イボカイミジンコが候補となると考えられる。

表(4)-4 イミダクロプリド施用区における種ごとの相対変化率

	平均	2011年	2011年	2012年	2012年	標準偏差
イトミミズ	-0.85	-0.74	-0.95	-0.83	-0.86	0.09
ショウジョウトンボ若虫	-0.60	-0.71	-0.77	-0.61	-0.32	0.20
シカクカイミジンコ属	-0.48	-0.79	-0.74	0.01	-0.40	0.37
コカゲロウspp若虫	-0.26	0.26	0.15	-0.85	-0.60	0.55
イボカイミジンコ属	-0.20	-0.13	-0.34	0.33	-0.64	0.41
シオカラトンボ若虫	-0.15	-0.43	-0.86	1.00	-0.30	0.80
ユスリカ幼虫	-0.14	-0.65	-0.08	1.00	-0.82	0.82
コムズムシsp成虫	-0.07	0.73	1.00	-1.00	-1.00	1.08
ミギワバエ幼虫	-0.04	0.06	-1.00	0.11	0.68	0.70
ナメラカハシミジンコ	0.01	0.13	-0.43	0.26	0.09	0.31
アオモンイトトンボ若虫	0.03	0.20	0.80	-0.69	-0.18	0.63
ホソタマミジンコ	0.07	-0.42	-0.60	1.00	0.28	0.73
チビゲンゴロウ成虫	0.16	0.30	0.30	0.03	0.01	0.16
ホソナガカイミジンコ属	0.16	-0.12	-0.66	1.00	0.43	0.71
ケンミジンコsp.1	0.17	0.00	0.14	1.00	-0.46	0.61
キベリヒラタガムシ成虫	0.44	1.00	-0.37	1.00	0.15	0.67
ゴミマルカイミジンコ属	0.69	0.69	1.00	1.00	0.06	0.44

#### 5) 茨城県つくば市における指標種候補の決定

特定の薬剤に対する指標種ではなく、ある地域における指標種を選択する場合には、薬剤を限定しない指標種候補についても考察する必要がある。ここではケーススタディとして、水田メソコムズム実験が行われた茨城県つくば市における指標種候補について決定する。水田メソコムズム実験データにおいて、全ての薬剤について平均した相対変化率を整理した結果、イトミミズ、シオカラトンボ、ショウジョウトンボにおいて大きな負の平均相対変化率が見られた（表(4)-5）。このうち、イトミミズについては対照区でのカウント数が極端に少ない場合もあるなど、指標として安定性には欠ける可能性がある。また、ナメラカハシミジンコ、コムズムシ、ユスリカ幼虫では中～弱程度の影響が見られた。これらのことから、薬剤を限定しない指標種候補としては、シオカラトンボ、ショウジョウトンボを先ず挙げられる。また、次点として、イトミミズ、ナメラカハシミジンコ、コムズムシ、ユスリカ幼虫についても指標種候補として挙げられる。

つくば市における水田メソコムズム実験からの以上の指標種候補についての考察の結果、つくば市における主要かつ安定的な指標種としては、先ずシオカラトンボ、ショウジョウトンボを採用することが適切である。また、イトミミズ、ナメラカハシミジンコ、コムズムシ、ユスリカ幼虫についても、やや指標としての安定性に欠ける傾向はあるものの、指標種として用いることができると考えられる。また、キベリヒラタガムシに対しては全ての農薬で影響がみられるわけではないものの、一部の農薬で大きな影響が見られる可能性があるため、指標種に加える一定の意義があると考えられる。また、アオモンイトトンボについてもクロチアニジン区でやや大きな負の影響が見られているため、クロチアニジンが施用されている場合になどには指標種として有用であると思われる。また、近年激減が指摘されているアキアカネ等のアカネ属の種については、水田メソコムズム実験では（アキアカネの発生は秋～冬季の圃場の水管理方法に強く依存するため）対照区においても多くの年において発生が見られなかった。そのため、アキアカネが「農薬影響」

に対する指標種として適切であることの根拠は相対的には弱いものではあるが、保全対象とする実際の水田においてアキアカネ等が生息する場合には、（それが必ずしも農薬影響の指標とはならないかもしれないが、環境保全についての一般指標としての意義も含みつつ）指標種として加えることを検討する意義は高いと考えられる。

表(4)-5 各薬剤施用区および全薬剤で平均した種ごとの相対変化率

生物種	平均変化率	フィプロニル	クロチアニジン	クロラン	イミダ	薬剤間標準偏差
イトミミズ	-0.59	-0.60	0.00	-0.98	-0.85	0.43
シオカラトンボ若虫	-0.53	-0.96	-0.44	-0.17	-0.15	0.38
ショウジョウトンボ若虫	-0.50	-0.89	-0.22	-0.05	-0.60	0.38
ナメラカハシミジンコ	-0.31	-0.36	-0.37	-0.39	0.01	0.19
コミズムシsp成虫	-0.26	-0.30	0.03	-0.60	-0.07	0.28
ユスリカ幼虫	-0.18	-0.21	-0.14	-0.22	-0.14	0.04
イボカイミジンコ属	-0.16	0.05	-0.26	-0.39	-0.20	0.18
キベリヒラタガムシ成虫	-0.13	-0.29	0.38	-0.76	0.44	0.57
コカゲロウspp若虫	-0.09	0.11	-0.48	0.08	-0.26	0.28
ホソタマミジンコ	-0.07	-0.28	-0.15	0.26	0.07	0.24
ケンミジンコsp.1	-0.02	-0.29	0.25	0.02	0.17	0.24
ホソナガカイミジンコ属	-0.02	0.10	-0.32	-0.03	0.16	0.22
アオモンイトトンボ若虫	-0.01	0.13	-0.39	0.12	0.03	0.24
シカクカイミジンコ属	0.01	0.48	-0.11	-0.30	-0.48	0.41
ミギワバエ幼虫	0.08	0.32	-0.21	0.03	-0.04	0.22
チビゲンゴロウ成虫	0.10	0.39	-0.01	-0.34	0.16	0.31
ゴミマルカイミジンコ属	0.14	-0.07	0.18	0.10	0.69	0.33
生物種間平均	-0.15	-0.16	-0.13	-0.21	-0.06	0.29
生物種間標準偏差	0.22	0.41	0.25	0.34	0.37	0.12

## 6) 愛媛における指標種の決定

愛媛における指標種の選出は、つくば市における水田メソコズム実験の結果を参考にしつつ、サブテーマ3における野外水田を用いた実験から大きな影響が示唆されたものを、指標種として選択することにより行なった。サブテーマ3の調査からの指標種としては、アキアカネ、ナツアカネ、コマツモムシ、マツモムシが挙げられる。

### (3) 影響評価のためのスコアリング法の構築

上記でつくば市および愛媛における指標種の選択を行なった。しかしながら、実質的にはこれらの指標種がもつ重要性や情報量は一律ではないと考えられる。まず、指標種選択の際に参照とした水田メソコズムの結果からはある種では一貫した結果が得られており、他の種では必ずしも一貫した結果が得られていない場合がある。指標がもたらす情報量の側面から考えると、一貫した結果が得られている種の個体数からの情報は、必ずしも一貫した結果が得られていない種の個体数からの情報よりも大きな情報量を含んでいる。また、それぞれの種の影響の程度も、「個体

が一匹も見られない」ような非常に強い影響と、「個体数が半減する」ような中程度の影響が混在している。また、水田生態系における重要性や、生活史から見た場合の脆弱性についても種ごとに異なるものと考えられる。さらに、生息している場合には個体数が比較的安定して存在する（対照区の調査において個体数がブレにくい）ことも指標としては望ましい性質であるが、どの程度個体数が安定しているかも種ごとによって大きく異なる。そのため、複数の指標種群を影響評価に用いる際には、それぞれの種が持つ重要性や情報量の違いにより重み付けすることが有効である。

本研究課題における重み付けの方法としては、指標種を重要な順に3、2、1の3つの“指標種スコア”のカテゴリーに分類する方法を採用した。まず、最も重要な種群として、つくば市の指標種では、シオカラトンボ、ショウジョウトンボ、アキアカネを“指標種スコア3”に分類した。これらの種は、その(1)負の影響の大きさ、(2)影響の一貫性、(3)水田生態系における重要性（これらの種群は水田水中における主要な高次捕食者の位置を占める）、(4)個体数の安定性、(5)生活史からみた脆弱性、の全てにおいて指標として望ましい性質を持っており、農薬の水田生態系への影響を調べる上でまず調査・評価の対象とすることが適切である。また、次に重要な種群としては、つくば市の指標種では、ナメラカハシミジンコ、コミズムシ、ユスリカ幼虫を“指標種スコア2”に分類した。これらの種群は必ずしも指標として望ましい性質の全てを満たすものではないが、これらの生物種が農薬の施用された水田で減少している場合には、農薬の影響が表れていることが示唆されるものと考えられる。さらに、農薬一般の影響は必ずしも明確ではないものの、指標種として加えることに一定の有用性がある生物として、イトミミズ、およびチビゲンゴロウ、ヒメガムシを“指標種スコア1”に分類した。これらは対照区においても個体数が安定しない（イトミミズ）、また必ずしも一貫した影響が見られない（チビゲンゴロウ）という制限があるが、大きな影響がありうる（イトミミズ）、他地域においても指標となりうる（チビゲンゴロウ）という側面から、調査・評価の対象とする意義があると考えられる。

愛媛における指標種については水田メソコズム試験から得られているほどの定量的なデータが揃っていないが、サブ3からの知見を基に主に水田生態系における重要性と生活史から見た脆弱性の観点から、アキアカネ、ナツアカネ、カトリヤンマ、ウスバキトンボ、コマツモムシ、マツモムシを“指標種スコア3”に、ミズカマキリ、ハイイロゲンゴロウ、チビゲンゴロウ、ヒメガムシを“指標種スコア2”とする。

影響評価のためのスコアリングについては、各指標種についての相対変化率を指標種スコアで重み付けしたものを、全指標種について足し合わせたものを影響評価のスコアとする。式で記述すると、指標種*i* (*i* = 1, ..., *n*)があるときに影響評価のスコアは：

$$\sum_{i=1}^n i \text{種の指標種スコア} \times \text{種}i \text{の相対変化率} \quad (\text{式}(4)-1)$$

により計算される。農薬による相対変化率は負の大きな値となるほど個体数の減少を表しているため、本スコアについても負の値が大きいほど影響があることを示すことになる。

#### (4) 水田用殺虫剤について地域ごとのリスク評価

つくば市において、水田メソコズム実験における各薬剤での指標種の相対変化率に対して上記式(4)-1のスコアリング法を適用した結果、各薬剤のスコアは、フィプロニルが-7.5、クロラント

ラニリプロールが-4.4、イミダクロプリドが-3.3、クロチアニジンが-3.0という値が得られた。このことから、つくば市においてはフィプロニルが施用されていた場合のリスクが最も大きいという評価が得られた。

愛媛における指標種については水田メソコズム試験から得られているほどの定量的なデータが揃っていないが、フィプロニル施用区においてトンボ類のヤゴ類の発生が見られないことから、現時点でのデータからは、つくば市と同様にフィプロニルが施用されていた場合のリスクが最も大きいという評価が得られた。

#### (5) 施用シナリオごとのリスク予測とリスク削減のための施策等の方向性の提言

施用シナリオにおいてもっとも重要なものは「どの農薬を使うか」である。以下、本研究課題において示された一連の科学的知見に基づき、各薬剤を施用したときのリスクの予測およびリスク削減のための施策の方向性の提言を行う。

##### 1) フィプロニル施用におけるリスク予測とリスク削減のための施策の方向性

フィプロニルの連用を続けた場合の水田生物へのリスクについては、サブテーマ1とサブテーマ3の結果から、水田内のトンボ類に顕著な減少がもたらされることが予想される。水田圃場における農薬濃度については、サブテーマ1とサブテーマ3の結果から、水中濃度については速やかな減少が予想される。しかしながら、水中濃度が低いにも関わらず水田の一部の水生生物に対する強い影響が見られていることから、その水中濃度の低さをもってリスクが低いと判断することはできない。フィプロニルの農薬濃度の評価においては、代謝・分解産物の濃度の評価も併せて行う必要がある。また、土壌への接触や摂餌経路での土壌を介した曝露の存在についても評価を行う必要がある。フィプロニルが連用されている水田における生態リスク削減の対策としては、もしトンボ類の保全を一義的な目的とするならば、クロラントラニリプロール等のトンボ類への毒性が一般に低い農薬への代替を進めることが一つの有力な候補となると考えられる。また、他の農薬への代替後もフィプロニルが複数年にわたり圃場中に比較的高濃度で残りつづける可能性があるため、フィプロニルおよびその代謝・分解物も含めて継続的に土壌中濃度の変化を把握することが必要である。

##### 2) クロチアニジン施用におけるリスク予測とリスク削減のための施策の方向性

クロチアニジンの連用を続けた場合の水田生物へのリスクについては、サブテーマ1とサブテーマ3の結果から、比較的広範な種群において中程度の減少がもたらされることが予想される。施用の規模と期間によっては、比較的感受性の強い種や内的自然増殖率の低い種については個体数の著しい減少に繋がる可能性もあり、トンボ類を中心に影響を継続的に調査する必要があると考えられる。水田圃場における農薬濃度については、土壌中に長期間残留する傾向が示唆されており、クロチアニジンの連用を続けた場合には長期的な土壌中濃度変化を把握することが望ましい。クロチアニジンが連用されている水田における生態リスク削減の対策としては、リスクの高いトンボ類などの調査を継続的に行うとともに、高濃度での曝露が生じている水田土壌および水中濃度の継続的な調査が有効である。

### 3) クロラントラニプロール施用におけるリスク予測とリスク削減のための施策の方向性

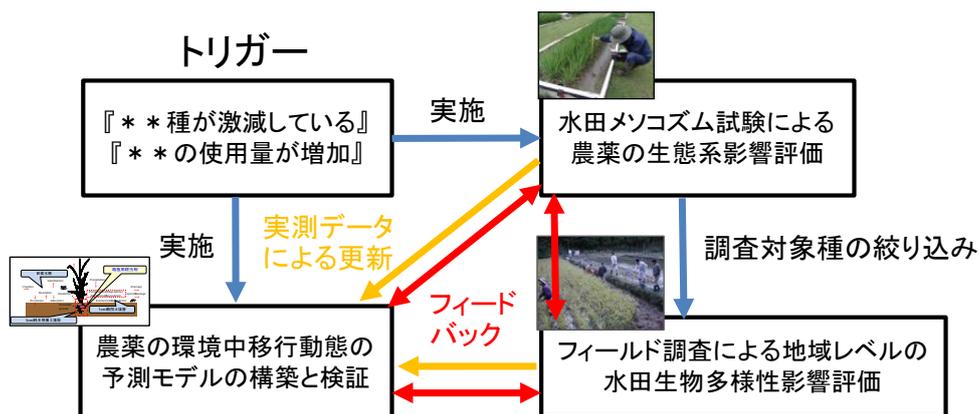
クロラントラニプロールの連用を続けた場合の水田生物へのリスクについては、サブテーマ1とサブテーマ3の結果から、トンボ類に対してのリスクは一般に小さいことが予想される。しかしながら、ミミズ・鞘翅目・半翅目等へのリスクは必ずしも小さいと予想されるわけではないため、トンボ類以外の生物への調査も継続的に調査する必要があると考えられる。水田圃場における農薬濃度については、土壌中に長期残留する強い傾向が示唆されており、連用における薬剤の残留については注視が必要である。継続的な実測により長期的な土壌中濃度の変化を把握する必要があると考えられる。

### 4) イミダクロプリド施用におけるリスク予測とリスク削減のための施策の方向性

イミダクロプリドの連用を続けた場合の水田生物へのリスクについては、既往の水田メソコズム試験とサブテーマ3の結果から、比較的広範な種群において中程度の減少がもたらされることが予想される。施用の規模と期間によっては、比較的感受性の強い種や内的自然増殖率の低い種については個体数の著しい減少に繋がる可能性もあり、トンボ類を中心に影響を継続的に調査する必要があると考えられる。水田圃場における農薬濃度については、サブテーマ3から長年の連用が行われてきた水田土壌において残留由来と思われる高濃度のイミダクロプリドが実測されており、特に長期連用の水田圃場においての高濃度の曝露が懸念される。イミダクロプリドについては長年にわたり主要な箱苗施用剤として用いられてきた経緯があり、まずこれまでの累積的な使用による残留が現在の水田中での濃度にどの程度影響しているかを明らかにすることが急務である。

## (6) 本サブテーマで構築された総合的評価システムのまとめ

本サブテーマでは、(1)水田メソコズム試験、(2)野外の実水田を用いたフィールド調査、(3)農薬の環境中動態モデル、を組み合わせる総合的に農薬の水田生物への影響を評価するシステムを構築した。本システムが新たな農薬に対して適用される際には次のような過程となる。「ある農薬によりある生物種が減少している」「ある農薬の使用量がある一定量を超えて増加している」といった何らかのトリガー情報が得られた場合に、それらの農薬について水田メソコズム試験を行い、その水田群集全体への影響について把握するとともに、その薬剤に大きな影響を受ける種群の特定を行う。また、並行してその農薬について環境中動態モデルによるシミュレーションを行うことにより、その農薬の曝露面からみた特徴（土壌への吸着や長期残留性の程度など）を明らかにする。さらに、それらの水田メソコズム試験等からの知見にもとづき重点調査対象とされた生物種について実水田におけるフィールド実験・調査を行うことにより、より早期かつ効率的にその農薬の影響についての一連の科学的知見を得ることが可能となる（図4-3）。



図(4)-3 農薬の水田生物多様性影響の総合的評価システムの概要

## (7) 総括

本研究課題の総括としての本サブテーマの結果は、農薬の水田生物多様性への影響の現状を科学的に解明する上で、以下の本質的な意義を持つ。まず、農薬の水田生物多様性への総合的評価システムの構築にあたって、サブテーマ1から得られた知見の検討から、水田の群集組成は概して年ごとの変動の影響の方が薬剤による影響よりも大きいことが示された。これは、農薬の水田群集への影響評価のためには単年の調査では誤った結論を導き出す危険性が高いことを意味するものであり、本研究課題が三年間という長期間の調査を地道に積み重ねたことの本質的な重要性を示すものである。

また、本研究課題は農薬の圃場中での濃度実測と生物調査の両面からの調査により、水田圃場内での実測濃度が低いにもかかわらず生物への影響が非常に大きい事例（フィプロニルの事例）があることを示した。これは、同一の対象に対して曝露の側面（濃度実測）および生物影響の側面（生物調査）からの多面的・総合的な調査を行うことにより初めて明らかになった事実であり、本研究課題において構築された総合的評価システムの本質的な有効性を示すものである。

さらに、本サブテーマでは、他サブテーマから得られた科学的知見と構築した総合的評価システムを基に、各農薬の施用における生態リスクの予測とリスク削減のための施策の方向性を示した。その結果、現時点での知見を総合すると、フィプロニルの水田生態系への影響が最も懸念されるという結論が得られた。また、いずれの農薬においても、（サブテーマ1および3において明らかにされた）農薬の複数年にわたる長期残留による影響を把握するために、施用量の多い農薬に対してはその水田圃場内での濃度レベルの実測による継続的な調査が必要であることが提言された。

今後の農薬の水田生態系へのリスクを管理する上での本研究課題の最大の貢献は、農薬の水田生物多様性影響の総合的評価システムが構築されたことである。今後、既存および新規の農薬について、ある農薬の使用に伴いある種が減少しているという情報が報告された、あるいは、ある農薬の使用量があるトリガーを超えた、という場合に、今回開発された影響評価システムを適用することにより、早い段階でそれらの農薬による水田生態系の劣化への対策を講じることが初めて可能となった。このことは、行政手続き的な制限により簡易的なものに留まらざるを得ない現状の農薬登録時の生態リスク評価を補完するものとして、日本の水田生態系の実効的な保全のために

極めて重要な意義を持つものである。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

水田生物多様性の影響評価システムの開発により、水田圃場環境下での農薬の曝露実態および影響の大きさを考慮した総合的な評価に基づく管理施策に関する提言を行うことが技術的に初めて可能となった。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

今後、既存および新規の農薬について、ある農薬の使用に伴いある種が減少しているという情報が報告された、あるいは、ある農薬の使用量があるトリガーを超えた、という場合に、今回開発された影響評価システムを適用することにより、早い段階でそれらの農薬による水田生態系の劣化への対策を講じることが初めて可能となった。

## 6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文（査読あり）>

1) Kasai A, Hayashi T I, Ohnishi H, Suzuki K, Hayasaka D and Goka K : Scientific Reports. DOI: 10.1038/srep23055 (2016)

「Fipronil application on rice paddy fields reduces densities of common skimmer and scarlet skimmer」

#### <その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

### (2) 口頭発表（学会等）

1) 笠井 敦、林 岳彦、早坂大亮、五箇公一：第61回日本生態学会大会（2014）

「ネオニコチノイド系農薬が水田の節足動物におよぼす影響」

2) 笠井 敦、林 岳彦、永井孝志、早坂大亮、五箇公一：第58回日本応用動物昆虫学会大会（2014）

「ネオニコチノイド系及びフィプロニル育苗箱処理剤が水田生物群集に及ぼす影響」

3) 笠井 敦、林 岳彦、早坂大亮、五箇公一：第20回日本環境毒性学会研究発表会（2014）

「水田メソコズム試験による農薬の生態影響評価（企画シンポジウム『生態学視点でのリスク

評価の今後－生物多様性を考えた環境毒性評価を発展させるために－』)」

- 4) 林 岳彦、笠井 敦、Boulangé Julien、渡邊裕純、日鷹一雅、五箇公一：第20回日本環境毒性学会研究発表会（2014）  
「農薬による水田生物多様性影響の総合的評価手法の開発：今までの1年半で何が分かったか」
- 5) 笠井 敦、林 岳彦、早坂大亮、五箇公一：第59回日本応用動物昆虫学会大会（2015）  
「ネオニコチノイド及びフィプロニルの複数年施用が水田節足動物に及ぼす影響」
- 6) 笠井 敦・林 岳彦・早坂大亮・五箇公一：第62回日本生態学会大会（2015）  
「ネオニコチノイド系農薬の複数年施用が水田の節足動物におよぼす影響」
- 7) 林岳彦：第63回日本生態学会（2016）  
「ネオニコチノイド農薬による水田生物多様性影響評価から見えたもの」
- 8) 笠井 敦・林 岳彦・大西一志・鈴木一隆・杉田典正・早坂大亮・五箇公一：第60回日本応用動物昆虫学会大会（2016）  
「フィプロニルの箱苗施用がトンボ相に及ぼす影響」
- 9) 林岳彦：第60回日本応用動物昆虫学会大会（2016）  
「ネオニコチノイド農薬による水田生物多様性影響評価から見えたもの」

### （3）出願特許

特に記載すべき事項はない。

### （4）「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 一般公開シンポジウム「ネオニコチノイド系農薬と生物多様性～何がどこまで分かっているか？ 今後の課題は何か？」（主催：国立環境研究所、2015年7月15日、国立環境研究所大山ホール、観客約200名）にて講演
  - 13:30-13:35 開会挨拶 国立環境研究所 理事長 住 明正
  - 13:35-14:05 「ネオニコチノイド系農薬の基礎知識」 永井孝志（農業環境技術研究所）
  - 14:05-14:35 「ネオニコチノイド系農薬等のハナバチ類への影響」 中村 純（玉川大学）
  - 14:35-15:05 「ネオニコチノイド系農薬の生態リスク評価」 五箇公一（国立環境研究所）
  - 15:05-15:35 「水田におけるネオニコチノイド系農薬影響実態」 日鷹一雅（愛媛大学）
  - 15:55-16:55 パネルディスカッション コーディネーター 林 岳彦（国立環境研究所）

### （5）マスコミ等への公表・報道等

- 1) 2016年3月16日 産経新聞 記事「農薬がトンボに悪影響 国立環境研、水田で実験」  
本推進費事業の成果（Scientific Reports）の紹介および五箇公一のコメント
- 2) 2016年3月17日 読売新聞 記事「新型農薬 トンボ減らす？」  
本推進費事業の成果（Scientific Reports）の紹介および五箇公一のコメント
- 3) 2016年3月17日 朝日新聞 記事「稲作用農薬 トンボ幼虫減った」  
本推進費事業の成果（Scientific Reports）の紹介および五箇公一のコメント

- 4) 2016年3月17日 日本農業新聞 記事「農薬がトンボに影響」  
本推進費事業の成果 (Scientific Reports) の紹介および五箇公一のコメント
- 5) 2016年3月17日 朝日新聞 記事「水田実験で生息数に差」  
本推進費事業の成果 (Scientific Reports) の紹介および五箇公一のコメント
- 6) 2016年3月16日 朝日デジタル 記事「水田の農薬、トンボに悪影響 国立環境研実験」  
本推進費事業の成果 (Scientific Reports) の紹介
- 7) 2016年3月17日 東奥日報 記事「農薬、トンボに悪影響」  
本推進費事業の成果 (Scientific Reports) の紹介および五箇公一のコメント
- 8) 2016年3月17日 新潟日報 記事「農薬、トンボに悪影響 殺虫剤フィプロニル 国立環境研水田で実験」  
本推進費事業の成果 (Scientific Reports) の紹介および五箇公一のコメント
- 9) 2016年3月18日 上毛新聞 コラム「三山春秋」  
本推進費事業の成果 (Scientific Reports) の紹介および五箇公一のコメント
- 10) 2016年3月19日 中国新聞 記事「稲の農薬トンボに悪影響」  
本推進費事業の成果 (Scientific Reports) の紹介および五箇公一のコメント
- 11) 2016年3月22日 日本経済新聞 記事「農薬がトンボに悪影響 国立環境研、水田で実験」  
本推進費事業の成果 (Scientific Reports) の紹介および五箇公一のコメント

#### (6) その他

特に記載すべき事項はない。

#### 8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

## **Development of Integrated Assessment for Investigating Pesticide Effects on Biodiversity in Paddy Fields**

Principal Investigator: Takehiko HAYASHI

Institution: National Institute for Environmental Studies (NIES)  
16-2 Onogawa, Tsukuba-City, Ibaraki 305-8506, JAPAN  
Tel: +81-29-850-2677 / Fax: +81-29-850-2920  
E-mail: hayashi.takehiko@nies.go.jp

Cooperated by: Tokyo University of Agriculture and Technology, Ehime University

### [Abstract]

**Key Words:** Pesticide, Neonicotinoids, Biodiversity, Paddy fields, Ecological risk assessment, Exposure assessment, Systemic insecticides, mesocosm, community-level effect assessment

Ecological effects of neonicotinoids and other systemic pesticides on paddy field in Japan were studied on the potential impact of neonicotinoids on paddy field in Japan. A main application field of neonicotinoids and other systemic pesticides is rice paddy fields. There are about 25000 km<sup>2</sup> of paddy field in Japan, and these provide broad wetland-like habitats for rural biological communities. From the 1990s, the use of systemic pesticides applied via nursery boxes for young rice plant has been increasing in Japan. However, ecological risk of these pesticides, especially those on biological community within paddy fields, has hardly been assessed. Given the increased concern for ecological risk of neonicotinoids, we conducted a project that consists of following 4 subprojects; (1) Ecotoxicological research by experimental paddy-field mesocosm and laboratory exposure test. (2) Ecological field research of real paddy fields that were applied with different systemic pesticides. (3) Development of compartment fate and transport models of systemic pesticides in paddy fields. (4) Integration of effect and exposure assessment and development of management methods. In this project, we focused on four popular systemic pesticides (clothianidin, imidacloprid, fipronil and chlorantraniliprole) in Japan. Our results suggest that (1) strong effects of systemic pesticides on some dragonfly species that is a key species in paddy field biological community, and (2) there are long-term residue of systemic pesticide with potentially harmful concentration to some non-target species in Japanese paddy fields. We also developed an integrated approach to assess ecological risk from systemic pesticides on paddy fields. Our risk assessment suggests that fipronil has the highest risk on biological community within paddy fields.