

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

誌名	日本生態學會誌
ISSN	00215007
著者名	小路, 晋作 伊藤, 浩二 日鷹, 一雅 中村, 浩二
発行元	日本生態学会暫定事務局
巻/号	65巻3号
掲載ページ	p. 279-290
発行年月	2015年11月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



特集 生物多様性に配慮した水田の自然再生

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

小路 晋作^{1,*}・伊藤 浩二¹・日鷹 一雅²・中村 浩二¹

¹ 金沢大学里山里海プロジェクト・² 愛媛大学大学院農学研究科

Effects of the low labor input farming, “V-furrow direct seeding method” on arthropod and plant diversity in rice paddy fields

Shinsaku Koji^{1,*}, Koji Ito¹, Kazumasa Hidaka² and Koji Nakamura¹

¹Satoyama Satoumi Project, Kanazawa University, ²Graduate School of Agronomical Research, Ehime University

要旨：水稲の省力型農法である「不耕起V溝直播栽培」（以降、V溝直播と略す）では、冬期にいったん給水し、代かきを行った後、播種期前に落水して圃場を乾燥させる。イネの出芽後（石川県珠洲市では6月中旬以降）から収穫直前まで湛水し、夏期の落水処理（中干し）を行わない。また、苗箱施用殺虫剤を使用しない。このようなV溝直播の管理方式は、水田の生物多様性に慣行の移植栽培とは異なる影響を及ぼす可能性がある。本稿では、石川県珠洲市のV溝直播と移植栽培の水田において、水生コウチュウ・カメムシ類、水田雑草、稲株上の節足動物の群集を比較し、以下の結果を得た：(1) V溝直播では6月中旬以降に繁殖する水生コウチュウ・カメムシ類の密度が高かった。この原因として、湛水期間が昆虫の繁殖期や移入期と合致すること、さらに苗箱施用殺虫剤が使用されないことが考えられた。(2) V溝直播では夏に広く安定した水域があり、そこにミズオオバコ等の希少な水生植物が生育し、有効な保全場所となった。(3) 両農法の生物群集は、調査対象群のすべてにおいて大きく異なり、両農法の混在により生じる環境の異質性が、水田の動植物のベータ多様性を高める可能性が示唆された。一方、V溝直播には以下の影響も認められた：(1) 4月から6月中旬にかけて落水するため、この時期に水中で繁殖する種群には不適である。(2) 初期防除が行われなかったため、一部の害虫（イネミズゾウムシ、ツマグロヨコバイ）の密度が増加した。本調査地におけるV溝直播水田では、慣行の移植栽培と同様に、8月中旬に殺虫剤散布が2回行われており、生物多様性への悪影響が懸念される。本調査の結果は、一地域に二つの農法が混在し、それぞれに異なる生物群集が成立することにより、今後の水田動植物の多様性が保全される可能性を示している。

キーワード：水管理、農薬、中干し、水生昆虫、水田雑草

はじめに

水田、水路、池などで構成される水田生態系は、日本の陸地面積の約6.6%（25,000 km²）に及ぶ広大な一時的湿地環境を形成し、多様な動植物の生存を支えてきた（守山 1997；日鷹 1998；Kiritani 2000；Washitani 2007）。しかし、1960年代中頃に始まった稲作の集約化は、水田と生物との関係を急速に変えた（桐谷・中筋 1977；Katayama

et al. 2015）：(1) 一部の化学合成農薬は非防除対象生物にも直接・間接的に作用した（Simpson and Roger 1995；Suhling et al. 2000；Hayasaka et al. 2012）。(2) 生産効率化のための圃場整備事業により水路と排水路が分離され、従来の泥深い「湿田」が水はけのよい「乾田」に転換された（中川 2004）。圃場整備は水田の生産効率を高めた一方、動植物の生息地としての機能を弱め、両生類（Fujioka and Lane 1997）、水生昆虫（西原ほか 2006；Kadoya et al. 2009）、淡水魚（Katano et al. 2003；Katayama et al. 2011）、水田雑草（清水 1998；嶺田 2002；Watanabe 2011）などの

2014年5月27日受付、2015年6月11日受理

*e-mail: s.koji@staff.kanazawa-u.ac.jp

多様性を減少させた。

この現状を改善するために、近年、各地で水田環境の保全・再生を意図した「環境配慮型農法」への取り組みが進められている。河川と水田の連結性の確保（魚道など）、人為的攪乱からの逃避場所の確保（水田脇の恒常的水域やピオトープ水田の設置）、環境や生物多様性に対して負荷の小さい農耕地管理体系の導入（無農薬、減農薬、冬期湛水、中干しの遅延、不耕起）などの環境配慮技術が、そこで生産された米に付加価値を加えている（日鷹 2010；Muramoto et al. 2010；Naruhara 2013）。

他方、水田稲作経営の安定性を高めるべく、条件の良い農地を中心にますます大規模化や効率化を可能とする技術体系への希求も強まっている。本稿では、稲作の効率化を図るべく開発され、現在、中部日本を中心に普及している「不耕起 V 溝直播栽培」（以降、V 溝直播と略す）が、水田の生物多様性に及ぼす影響を検討する。水稻の直播栽培には多くの方式があるが（Farooq et al. 2011）、V 溝直播は乾燥させた圃場に播種し、イネの出芽後に圃場に導水する「乾田直播栽培」のひとつである（寺島 2012）。当農法を適用した水田では、イネの出芽後から収穫直前まで湛水され、夏期の落水処理（中干し）が行われない（濱田ほか 2007）。また、慣行の移植栽培で広く用いられる苗箱施用殺虫剤（後述）が使用されない。このように特徴的な水管理や農業用法を有する V 溝直播水田の生物群集は、移植水田とは異なっている可能性がある。しかし、これまで V 溝直播が生物多様性に及ぼす影響が検討されたことはなかった。

筆者らの調査地である能登地方では 2011 年 6 月、石川県珠洲市など 4 市 5 町を含む「能登の里山里海」が国連食糧農業機関（FAO）の世界農業遺産（GIAHS）に認定された。GIAHS は、伝統農業、生物多様性が守られた景観、農耕文化などが複合した農業システムを有する地域を指し、その次世代への継承と発展が認定の目的である（武内 2013）。しかし、GIAHS に認定されたとはいえ、能登地方では伝統農業と生物多様性との関連についての検証はこれからである。また、現在行われている稲作体系が生物多様性に及ぼす影響の検証例もなかった。そこで、能登地方における農業システムの評価の一環として、筆者らは 2010 年に V 溝直播の生物多様性に及ぼす効果検証のための調査を行い、興味深い知見を得た（Watanabe et al. 2013；Koji et al. 2014）。

本稿では、V 溝直播水田の攪乱特性を述べるとともに、V 溝直播水田と慣行の移植水田における水生昆虫、稲株上の節足動物および水田雑草の多様性を比較した調査結

果を紹介する。また、V 溝直播水田における水管理と苗箱施用殺虫剤の不使用が水田の生物多様性に及ぼす影響を議論し、V 溝直播を水田の環境配慮技術の側面から評価する。

V 溝直播栽培の概要と水田における人為的攪乱の特性

水稻の乾田直播栽培は、1970 年代から省力型栽培技術として期待されてきたが、出芽不良、鳥害、雑草防除の困難、圃場の漏水、イネの倒伏など、多くの課題が指摘されてきた（寺島 2012）。このようななか、愛知県ではイネの発芽率の向上を目的として、地表に深さ 5 cm ほどの V 字状の溝を付けて播種する播種機が 1989 年に開発され、出芽不良や鳥害の問題が改善された。その後、研究・普及機関と農家との協働により、圃場の整地法や除草技術等に改良が施され、上記の諸課題を解消する V 溝直播の栽培技術体系が確立された（伊藤 2011）。

V 溝直播では、播種前の整地（圃場の均平化）が栽培技術上の重要なポイントである（濱田ほか 2007）。そのため、冬期に耕起と代かきを行って圃場を乾燥固結させる。また、通常の直播栽培では、還元状態の土壤中に発生する有害成分（硫化水素など）を除去するため夏期中干しを行うが、V 溝直播では、湛水下での土壤還元化の程度が小さいことなどを理由に、中干しを行わないことが多い（愛知県農業総合試験場 2007）。なお、V 溝直播の導入要件として、冬期に十分な給水が可能な水利環境が整っていることなどがある。

農業経営における V 溝直播の利点は、慣行の移植栽培と同等の収量を保ちながら、育苗や苗の移植作業を省力化できる点である（濱田ほか 2007）。移植栽培に比べ、10 アールあたりの労働時間を約 3 割、生産費を約 1 割削減できる（愛知県農業総合試験場 2007）。また、水田経営面積が 10 ヘクタール以上になると、通常の移植栽培では耕起、移植、収穫の時期に作業が集中しやすく、スケールメリットを活かしくくなる。しかし、耕起、移植、収穫作業のタイミングが異なる V 溝直播を移植栽培と組み合わせると、作業が平準化され、さらなる規模拡大が可能となる。このような理由から、近年、移植栽培と V 溝直播を組み合わせて経営安定化を図る中・大規模農家が増加している。

水田生態系の観点からみると、V 溝直播は水環境、農薬による環境負荷、耕起スケジュールの点で独特である。例として、石川県珠洲市 N 地区における慣行の移植栽培

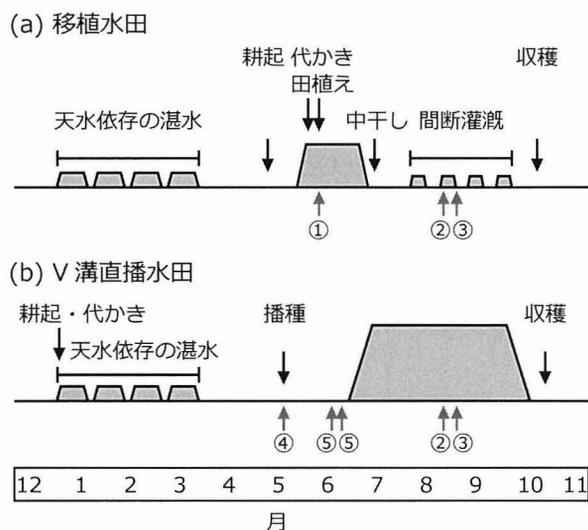


図1. 石川県珠洲市N地区における移植水田(a)とV溝直播水田(b)の栽培スケジュール。グレーの範囲は相対的な田面水位を表す。グレーの矢印は農薬の施用時期を示す。①殺虫剤(クロチアニジン)、殺菌剤(イブコナゾール、水酸化第二銅、ジクロシメット)、除草剤(イマズスルフロン、ピラクロニル、プロモプチド)；②殺虫剤(エトフェンプロックス)、殺菌剤(トリシクラゾール、ベンシクロン)；③殺虫剤(ジノテフラン)、殺菌剤(トリシクラゾール)；④殺菌剤(チラウム)；⑤除草剤(シハロホップブチル、ペンタゾン)。

とV溝直播の栽培スケジュールを図1に示す。この地区における慣行水田では、冬期に意図的な給水は行われませんが、降雨・降雪により圃場の土壌湿度が高く維持される。5月から6月にかけて代かきと田植えが行われ、圃場が湛水される。7月頃に中干しが行われ、土壌が約10日間乾燥する。以後、9月下旬にかけて間断灌溉(数日おきの給水)あるいは降雨により間断的に湛水状態となる。一方、V溝直播水田では冬期(12月中旬)にいったん給水されて代かきが行われ、以後、給水は行われませんが、降雨・降雪により間断的に圃場が湛水状態となる。V溝直播水田では3月下旬に落水されてイネの播種が行われ、6月中旬まで水の無い乾燥した状態が続く。イネが2葉期に達した頃に再び水田が給水され、10月上旬の収穫直前まで水深約10~15cmの水位が維持される。このように、V溝直播では5月以降、移植栽培と入れ替わるタイミングで落水と導水が行われる。

2010年におけるN地区での農薬使用頻度(成分回数)は、慣行の移植水田では12回(殺菌剤6、殺虫剤3、除草剤3)、V溝直播では10回(殺菌剤4、殺虫剤2、除草剤4)であった。V溝直播では、育苗箱施用殺虫・殺菌剤(クロチアニジン・ジクロシメット粒剤)を使用しない一方、

イネの出芽前後に除草を重点的に行うため、除草剤の使用回数が多かった。8月中旬にV溝直播と移植の両水田に対して、斑点米カメムシ防除を目的とした殺虫剤(エトフェンプロックス、ジノテフラン、各1回)が散布された。

V溝直播が水生昆虫、稲株上の節足動物、水田雑草の多様性に及ぼす影響：石川県における検討事例

V溝直播の管理方式は水田の生物多様性に移植栽培とは異なる影響を及ぼす可能性があるが、その効果はこれまで検討されていない。そこで筆者らは、石川県珠洲市N地区の生産圃場において、水生コウチュウ・カメムシ類、水田雑草、および稲株上の節足動物を対象として両水田の生物群集を比較した(水生トンボ目については、野外条件下では幼虫の種同定が困難であるため対象としなかった)(Watanabe et al. 2013; Koji et al. 2014)。野外調査は、隣接する2農区において慣行の移植水田と導入3年目のV溝直播水田を4筆ずつ無作為に選び、以下の手順で実施した(調査地の詳細はKoji et al. 2014を参照)。

水生のコウチュウ目とカメムシ目については、各水田内の畦際周辺から無作為に抽出した40箇所、四角型フレームのタモ網(目幅1mm未満、フレーム幅30cm)を用いて採集し、種ごとに成虫と幼虫の個体数を計数した。2010年5月から9月にかけて毎週、合計21回の調査を実施した。落水され水場がない圃場では採集を行わなかった。このため圃場当たりの採集回数は、移植水田では7~11回、V溝直播水田では10~15回となった。稲株上の節足動物については、各水田内から無作為に抽出した10箇所において、直方体(50cm×60cm、高さ90cm)の枠内の陸上節足動物をハンドブローによる吸引採集装置を用いて採集し、目ごとに計数し、個体数と分類群の組成を分析した(現在、種レベルの計数を進めている)。2010年6月から8月にかけて2週間ごとに調査を行った。V溝直播水田ではイネの発芽時期が遅かったため、6月には調査を実施しなかった。このため調査の実施回数は、移植水田では6回、V溝直播水田では4回となった。植物については、2010年の8月下旬から9月上旬にかけて調査を実施した。各水田の内部に1m²の方形区を無作為抽出により5~10個ずつ設け、維管束植物、コケ類および藻類の被度を種ごとに目測した。

水生昆虫と陸上節足動物は水田を、植物は方形区をサンプル単位として統計解析し、以下を検討した。V溝直播水田では、移植水田と比較して(1)各分類群の個体数

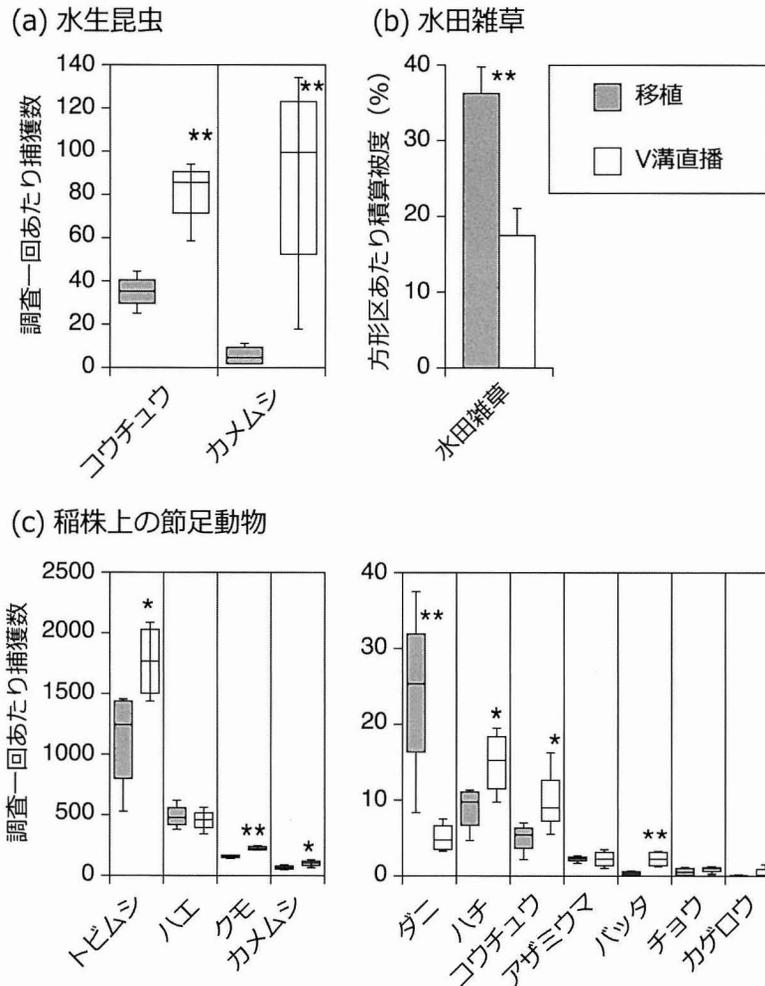


図2. V溝直播水田と移植水田における水生昆虫 (a)、水田雑草 (b)、稲株上の節足動物 (c) の分類群ごとの個体数。稲株上の節足動物は優占した4目(トビムシ目、ハエ目、クモ目、カメムシ目)と、その他の目に分けて示した。バーの高さは平均値を、誤差線は標準誤差を示す。箱ひげ図中の横線は中央値を示す。一般化線型モデル(a、c)、t検定(b)により検定した(* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$)。Watanabe et al. (2013)、Koji et al. (2014)より改図。

や種数が多いか。(2) 生物群集の組成(水生昆虫および水田雑草の種組成、陸上節足動物の目組成)が異なるか。特有の構成種が存在するか。(3) 希少種の生息地として寄与しているか。

個体数や種数は多いか

V溝直播水田と慣行の移植水田における各分類群の個体数を図2に示す。V溝直播水田における水生のコウチュウ目とカメムシ目の密度(調査1回あたり個体数)は、移植水田よりも著しく高かった(図2a)。一方、V溝直播水田における植物の積算被度は移植水田よりも低かった(図2b)。稲株上の節足動物の密度は分類群ごとに傾向が異なり、トビムシ目、クモ目、カメムシ目、ハチ目、コウチュウ目、バッタ目はV溝直播で高く、ダニ目は移植

水田で高かった(図2c)。

次に、水生昆虫と植物の種数を農法間で比較した。水生コウチュウ目の種数(水田4筆の平均値)は、移植水田(7.9種)よりもV溝直播水田(10.6種)で多かった(Watanabe et al. 2013)。カメムシ目では農法間の差は検出されなかった(V溝直播4.0種;移植3.0種)。一方、植物の出現種数(方形区あたり平均値)は、移植水田(13.07種)よりもV溝直播水田(5.69種)で少なかった(Koji et al. 2014)。

群集の組成は慣行の移植水田と異なるか。特有の構成種が存在するか

両農法の水田における水生コウチュウ、水生カメムシ、植物の種組成、および陸上節足動物の目の組成を序列化

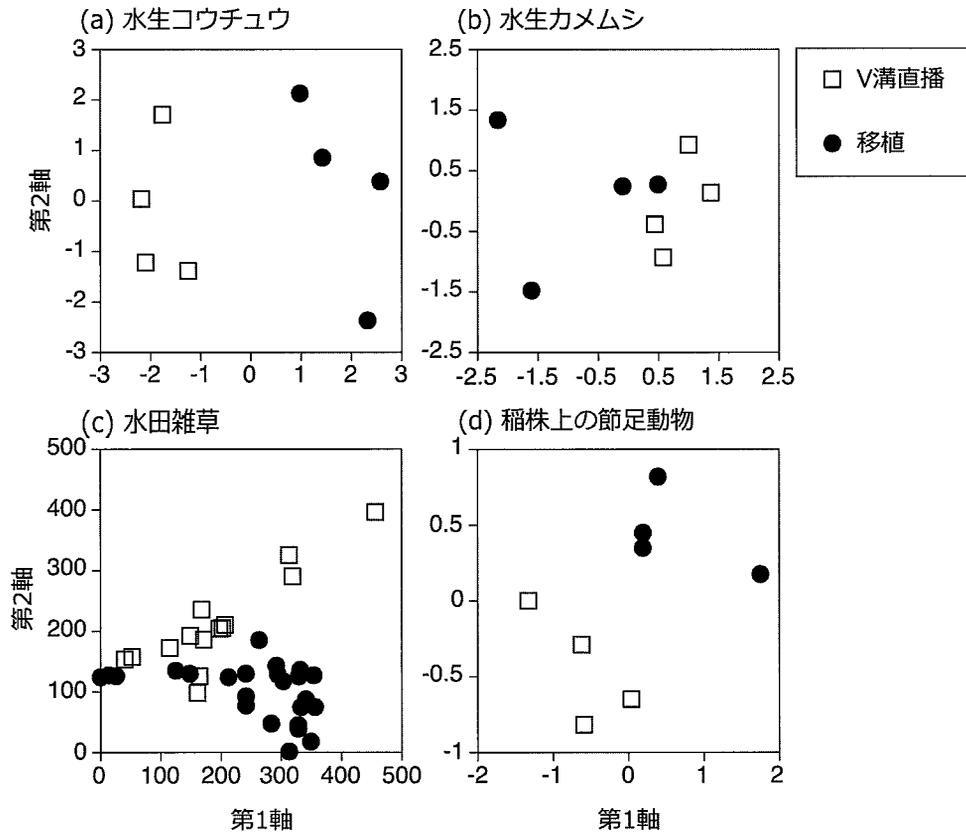


図3. 水生コウチュウ目 (a)、水生カメムシ目 (b)、水田雑草 (c) の種構成および稲株上の節足動物 (d) の目構成の序列化。主成分分析 (a、b)、除歪対応分析 (c)、非計量多次元尺度構成法 (d) により解析した。Watanabe et al. (2013)、Koji et al. (2014) より改図。

法により分析したところ、どの分類群も農法間で明瞭に異なっていた (図3)。

水生昆虫群集を特徴づける構成種を指標種分析により抽出したところ、V溝直播水田では8種、移植水田では4種の指標種が抽出された (表1)。V溝直播の指標種の季節消長を調べたところ、いずれも7~8月に成虫の個体数がピークに達した (Watanabe et al. 2013)。これらの指標種群では、成虫だけでなく多数の幼虫が捕獲されたことから、V溝直播水田で繁殖していることが示唆された。夏期を通じて湛水されるV溝直播水田は、夏に繁殖する水生昆虫類の育成・繁殖場所となり、夏に繁殖する種の個体数が多かった。コガシラミズムシ *Peltodytes intermedius* では、中干し前の移植水田で多数の幼虫が観察され、その後、7月中旬頃にV溝直播水田において成虫個体数のピークが観察された (Watanabe et al. 2013)。このため本種では、幼虫が移植水田の指標種として、成虫がV溝直播水田の指標種として抽出された。

移植水田における植物の指標種には、ヤナギタデ

Persicaria hydropiper、アメリカアゼナ *Lindernia dubia* subsp. *major*、トキンソウ *Centipeda minima* などの一年生植物が含まれた (表1)。一方、V溝直播水田の指標種としてクログワイ *Eleocharis kuroguwai* のみが抽出された。指標種分析による統計的有意差はなかったが、アオウキクサ *Lemna aoukikusa* やミズオオバコ *Ottelia alismoides* などの水生植物が特徴的に生育した。

希少種の生息地として貢献しているのか

本調査で確認された希少種 (環境省あるいは石川県のレッドデータ掲載種) の出現パターンを農法間で比較した (表2)。水生昆虫では、希少5種のうちマルガタゲンゴロウ *Graphoderus adamsii*、クロゲンゴロウ *Cybister brevis*、ゲンゴロウ *Cybister chinensis* の3種は、移植水田よりもV溝直播水田で個体数が多かった (残りの2種は、ミゾナシミズムシ *Cymatia apparens* とヒメマルミズムシ *Paraplea indistinguenda* が1頭ずつ、それぞれ移植水田とV溝直播水田で捕獲された)。これらのゲンゴロウ科3種

表 1. 移植水田および V 溝直播水田の指標種。

	移植水田	V 溝直播水田
水生昆虫	コガシラミズムシ (幼)	コガシラミズムシ (成)
	ゴマフガムシ (成)	ヒメガムシ (幼) (成)
	ヤマトゴマフガムシ (成)	キイロヒラタガムシ (幼) (成)
	マツモムシ (幼)	チビゲンゴロウ (幼) (成)
		ヒメゲンゴロウ (幼) (成)
		ハイロゲンゴロウ (幼)
		クロゲンゴロウ (幼)
		コミズムシ属 spp. (幼) (成)
水田雑草	コハタケゴケ	クロゲワイ
	ヤナギタデ	
	タネツケバナ	
	チョウジタデ	
	アメリカアゼナ	
	アゼトウガラシ	
	トキンソウ	
	イヌビエ	
	イヌホタルイ	

注：コミズムシ属 spp. は、エサキコミズムシ *Sigara septemlineata* とコミズムシ *S. substriata* を含む。水生昆虫については成虫 (成) と幼虫 (幼) に分けて分析した。Watanabe et al. (2013)、Koji et al. (2014) より作成。

では、いずれも 7～8 月に幼虫が観察されたことから、V 溝直播水田を夏の成育場所として利用していたと考えられる。

植物では、6 種の希少種が確認され、V 溝直播水田ではミズオオバコが、移植水田ではイチョウウキゴケ *Ricciocarpus natans*、ミズワラビ *Ceratopteris thalictroides*、マルバノサワトウガラシ *Deinostema adenocaulum*、シャジクモ *Chara braunii* が特徴的に出現した。キクモ *Limnophila sessiliflora* は両農法に出現し、出現頻度 (総方形区数に対する対象種が出現した方形区数の割合) に農法間の差がなかった。V 溝直播水田では 6 月上旬に除草剤 (茎葉処理剤) が施用されるため、6 月以降に発芽する種のみが生残できると考えられる。また、夏期を通じて水深約 10～15 cm の深水が維持されるため、深水条件下で生育・繁殖できる生理特性も必要となる。ミズオオバコは発芽時期が遅く、さらに深水環境に適応しているため (嶺田ほか 2006; 八木ほか 2009; Yin et al. 2009)、V 溝直播水田の生育環境に適合し、特徴的に出現したと考えられる。

農法間の生物群集構造の差異に関与する要因

V 溝直播が移植栽培と異なる生物群集構造を生み出す潜在的要因として、本調査から示唆される水管理および農薬との関係について述べる。

水管理による影響

V 溝直播の水管理の特徴は「中干しの不実施」と「湛水開始の遅延」である。中干しは、水田の水生生物の個体数や種多様性に大きな影響をおよぼす (Kimura 2005)。例えば Mogi (1993) は、夏期中干しと間断灌漑を行った通常の水田と、中干しが行われずに湛水を続けた水田の水生昆虫相を比較した。その結果、中干しが行われた水田では夏期に昆虫の多様性が減少し、特にゲンゴロウ科やガムシ科の幼虫など捕食者の個体数が著しく減少した。水田の水中生物群集は、田植え直後に植物・動物プランクトンや腐食性のユスリカなどが優占し、シーズンの後半に捕食者が優占するという季節パターンを示す (Settle et al. 1996; Schoenly et al. 1998; Leitão et al. 2007; Bloechl et al. 2010)。このことから、中干しは田植えを契機に開始された水中生物群集の遷移を初期段階にリセットしたと考えられる (Lawler 2001)。一方、夏に長期間湛水される V 溝直播水田では、水生生物群集の遷移が中干しにより中断せず、捕食性のコウチュウ・カメムシ類の数が増加したと考えられる (Watanabe et al. 2013)。

V 溝直播において水田雑草の積算被度と種多様性が低かった原因は、中干しの不実施と考えられる。ヤナギタデ、アメリカアゼナ、トキンソウ、タカサブロウ *Eclipta thermalis*、アゼトウガラシ *Lindernia angustifolia*、チョウジタデ *Ludwigia epilobioides*、ヒナガヤツリ *Cyperus flaccidus*、タネツケバナ *Cardamine flexuosa*、ミズワラビなどの一年生植物は、V 溝直播水田には殆ど出現せず、

表2. 移植水田およびV溝直播水田において出現した希少種の個体数。

	種	移植水田	V溝直播水田
水生昆虫	マルガタゲンゴロウ	3/0	7/1
	クロゲンゴロウ	3/1	21/1
	ゲンゴロウ	0/0	4/0
	ミヅナシミズムシ	0/1	0/0
	ヒメマルミズムシ	0/0	0/1
水田雑草	ミズオオバコ	0	10.5
	イチョウウキゴケ	5.3	0
	ミズワラビ	42.1	0
	マルバノサワトウガラシ	10.5	0
	シャジクモ	15.8	0
	キクモ	5.3	5.3

注:水生昆虫については採集個体数(幼虫/成虫)を、水田雑草については出現頻度(%)を示す。Watanabe et al. (2013)、Koji et al. (2014)より作成。

移植水田において中干し後の短期間に生育、開花、結実していた(伊藤浩二未発表データ)。これらの種の多くは、水面から露出した田面に発生し(根本ほか2005)、発芽に一定以上の酸素濃度を必要とする。V溝直播水田では夏期を通じて深水が維持されるため、このような好気的条件下で発芽する種の生育に不適である。

V溝直播水田の初夏の湛水開始期は、農作業の重複を避けるため、慣行の移植水田と異なることが多い。N地区のV溝直播水田では、3月下旬から6月中旬まで圃場を乾燥させ、湛水開始は移植水田よりも約一ヶ月遅かった。この湛水開始の遅延は、稲株上の節足動物相に影響を及ぼす可能性がある。一般に、水田の陸上部では腐食性のハエ目(主にユスリカ科)が田植え直後から大量に発生し、クモ類がこれらを餌として増殖し、シーズン後半にはクモ類がウンカ類などの重要な捕食者となる(Settle et al. 1996; Hidaka 1997)。しかし、V溝直播水田では、ハエ目の初期の大量発生は見られなかった(Koji et al. 2014)。したがって、V溝直播水田に生息するクモ類はシーズンの初期に餌不足になると考えられたが、クモ類の密度はV溝直播水田の方が移植水田よりも高かった(図2c)。この結果は、V溝直播水田ではハエ目以外の餌動物(特にトビムシ目)が多く、これらにクモ類が依存していた可能性を示唆している。直接観察による食性分析によれば、多食性捕食者であるコモリグモ類の餌メニューは季節により変化し、シーズン後半にはウンカ・ヨコバイ類などのカメムシ目やトビムシ目など、多様な餌動物を摂食する(Ishijima et al. 2006; 日鷹2012)。今後、V溝直播水田におけるクモ類個体群と餌動物量の季節消長について種レベルの解析が必要である。

農薬の影響

現在、慣行農法による水稻の栽培には、栽培初期から中期に発生する病害虫の防除と予防を目的として長期残効型育苗箱施用剤(育苗箱施用殺虫剤)が広く使用されている。育苗箱施用殺虫剤はイネの育苗箱に施用され、農薬の有効成分が苗に吸収されることにより害虫に作用する。また、苗や苗土に付着した薬剤が田植え時に土中へ混和されることで長期間持続的に防除効果を発揮する。育苗箱施用殺虫剤のうち、いくつかの成分において、アキアカネ *Sympetrum frequens* などの水生昆虫(神宮寺ほか2009; Jinguji et al. 2013)と水生動物群集への影響(Sánchez-Bayo and Goka 2006; Hayasaka et al. 2012; 本林ほか2012)が報告されている。一方、V溝直播水田では苗を移植せず、イネ籾を直播するため、育苗箱施用殺虫剤は使用されない。また、N地区のV溝直播水田では、育苗箱施用剤以外の殺虫剤も6月から(斑点米カメムシ防除の殺虫剤が撒かれる)8月中旬まで施用されなかった。従って、栽培初期から中期にかけて殺虫剤の影響がなかったことが、水生コウチュウや水生カメムシの個体数を増加させた可能性がある(Watanabe et al. 2013)。

V溝直播が水田生物群集に及ぼす影響

水生の昆虫と植物に及ぼす影響

本調査結果から、V溝直播が水田の生物群集やその構造にもたらす効果として以下が考察された。(1)水生のコウチュウ・カメムシ目の個体数を増加させる。これらのうち水田依存種の多くは、一時的な水域である水田と、恒久的な水域である水路やため池を季節的に移動する(日比ほか1998; Lawler 2001)。例えば、島根県東部の山地に生息するクロゲンゴロウなど7種では、5月から6月

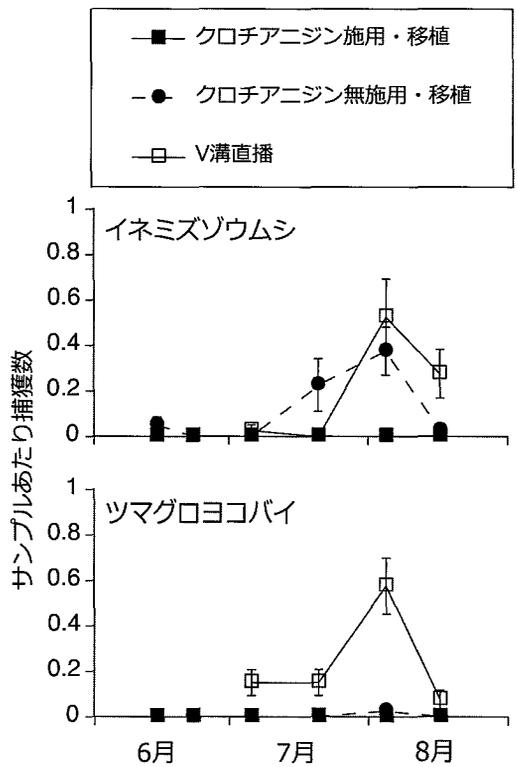


図4. 石川県珠洲市N地区のクロチアニジンを施用した移植水田(■)、クロチアニジン無施用の移植水田(●)、V溝直播水田(□)におけるイネミズゾウムシとツマグロヨコバイの季節消長。各4水田の調査から得た平均値と標準誤差を示す。Koji et al. (2014) より改図。

にかけて成虫がため池から水田に飛来して産卵し、幼虫期を水田で過ごした後、新成虫が中干し開始期(6月下旬)以降にため池に戻る(西条 2001)。N地区において、クロゲンゴロウを含むV溝直播の指標種では、移植水田で中干しが始まる7月以降にV溝直播水田で成虫の個体数が増加し、次世代の幼虫が多数成育した。夏に繁殖する水生昆虫類にとって、V溝直播水田では移植水田よりも湛水期間が昆虫の繁殖期と良く適合し、さらに苗箱施用殺虫剤の影響がないので幼虫の成育場所として好適であると考えられた。(2) V溝直播水田は希少な水生植物に生育場所を提供する。近年、水田の乾田化や除草剤の多用に伴い、湿田環境に適応した水田雑草が希少化している(Watanabe 2011)。これらの種の生育場所は、休耕田、ため池の浅水域、用排水路、造成された水辺ビオトープなどに限られ(日鷹ほか 2006)、水田依存性の高い種は一部の伝統的栽培方法による無農薬田にしか見られなくなった場合もある(嶺田 2002; 日鷹 2006; 嶺田 2006)。N地区の移植水田では、水生の水田雑草の分布は圃場内

部に残された一時的な水たまりなどに限られる(伊藤浩二 未発表データ)。一方、V溝直播により夏期を通じて圃場全面に形成される水域は、一部の水生植物種の生育場所となり得る。ミズオオバコなど、深水を好む沈水性植物の存続にとって、このような水域が確保される意義は大きい。

害虫および雑草個体群に及ぼす影響

N地区のV溝直播水田と移植水田の稲株上で捕獲された害虫5種(セジロウンカ *Sogatella furcifera*、ヒメトビウンカ *Laodelphax striatellus*、ツマグロヨコバイ *Nephotettix cincticeps*、イネクビボソハムシ *Oulema oryzae*、イネミズゾウムシ *Lissorhoptus oryzophilus*)の個体群密度を比較したところ、イネミズゾウムシとツマグロヨコバイではV溝直播水田の方が高密度であり、初期防除をしない場合にはこれら2種による被害拡大が懸念された(Koji et al. 2014)。

イネミズゾウムシの季節消長を、苗箱施用殺虫剤(クロチアニジン)を施用した移植水田、クロチアニジン無施用の移植水田、V溝直播水田の3農法間で比較したところ(図4)、クロチアニジン施用水田では全季節を通じて低密度であったが、無施用とV溝直播では成虫が高密度となった。このことから、クロチアニジン施用による初期防除の有無が農法間の密度差の原因と考えられた。V溝直播水田では苗箱施用殺虫剤の影響がないため、越冬成虫がイネに産み付けた卵から孵化した幼虫の生存率が高く、新成虫が羽化する7月~8月にかけて成虫の個体数が増加したと考えられる。

ツマグロヨコバイの個体数は、移植水田ではクロチアニジン施用の有無によらず季節を通じて少なかった(図4)。したがって、殺虫剤の不施用がV溝直播水田における高密度の原因とは考えにくい。むしろ、耕起時期の違いに起因する初夏の圃場内植生の違いが、農法間の密度差の原因となった可能性がある。すなわち、5月に耕起・代かきが行われる移植水田では雑草は低密度であったが、冬期に代かきが行われるV溝直播水田では、4月から6月上旬にかけてイネ科のスズメノテッポウ *Alopecurus aequalis*が繁茂していた。初夏のV溝直播水田では、ツマグロヨコバイの越冬世代成虫がスズメノテッポウにおいて繁殖し、次世代の個体数が増加した可能性がある。同様の傾向は、不耕起栽培水田で本種の動態を調べたHidaka (1993, 1997)も指摘している。

クログワイはV溝直播水田で発生量が多かった雑草のひとつである。本種は塊茎からの萌芽期間が長く、代か

き後 30 日目を以降も発生し続けるため、除草剤施用の時期が見極めにくく化学的防除が困難である (小林 1984)。本種の発生量が農法間で異なった原因の一つとして、施用された除草剤の残効性の違いが考えられる。すなわち、V 溝直播水田では残効期間の短い茎葉処理剤が施用されたため、施用後に発芽・出芽したクログワイに対する除草効果は比較的弱かった可能性がある。一方、移植水田では残効期間の長い初・中期除草剤が使用されたため、田植え後に発芽・出芽した本種に対して、より有効に作用したと考えられる。また、本種は特定の V 溝直播水田に偏って出現する傾向がみられたことから (伊藤浩二 未発表データ)、各圃場の作付履歴や、水はけ等の立地環境の違いが発生量に影響を及ぼした可能性もある。これらの要因の検討は今後の課題である。なお、地域によっては、秋耕や春耕による塊茎の乾燥枯死や大豆等の作付けによるクロープローテーションなどの耕種的防除が本種への対策として有効とされている (Shibayama 2001)。

このほかに V 溝直播で懸念される雑草害として、高い脱粒性や色素米をもつ雑草イネのほか、イヌビエ *Echinochloa crus-galli* や オオクサキビ *Panicum dichotomiflorum* といったイネ科雑草の増加による被害が指摘されている (森田 2011)。本調査地である N 地区においても、5 年間連続して V 溝直播を適用した水田では、イヌビエをはじめとするイネ科雑草の増加傾向が認められた (伊藤浩二 未発表データ)。これらイネ科雑草は、斑点米被害を引き起こすカスミカメムシ類の食草でもあり、斑点米被害を低減するには管理が重要である (樋口 2010)。V 溝直播水田におけるイヌビエ発生量の増加傾向は、水田の土壤特性により生じた可能性がある。耕起が水田雑草の初期発生に及ぼす影響を調べた嶺田・日鷹 (2002) によると、春先に耕起・代かきを行う通常の水田では、給水後に土壤が急激に還元化し、還元条件下で発芽が促進されるコナギ等の発生量が急増した。一方、不耕起の水田では、土壤還元化の進行は緩やかであるためコナギ等の発生が抑えられ、発芽における酸素要求度が比較的高いイヌビエ (片岡・金 1978) が優占した。V 溝直播水田でも、土壤還元化の進行は緩やかであることから (愛知県農業総合試験場 2007)、不耕起水田と同様のプロセスによりイネ科雑草が優占していく可能性がある。

V 溝直播水田では、イネの出芽後に水深約 10 ~ 15 cm の深水管理が行われる。一般に、水田の深水管理により生じる低酸素分圧条件下では、コナギ *Monochoria vaginalis* var. *plantaginea*、キカシグサ *Rotala indica* var. *uliginosa*、ミゾハコベ *Elatine triandra*、イヌホタルイ

Schoenoplectus juncooides などの雑草が問題となる (荒井・宮原 1956; 中井・鳥塚 2009; 住吉ほか 2011)。しかし、本調査結果によれば、V 溝直播水田におけるこれらの発生量は軽微であった (Koji et al. 2014)。コナギの発生量が軽微であった原因としては発芽・生育条件の不適合が考えられる。すなわち、コナギは低酸素分圧下で発芽が良好であるが (片岡・金 1978)、V 溝直播水田では土壤還元化の進行が緩やかであるため、通常の水田より発芽率が低かった可能性がある。同様の傾向は、不耕起水田で本種の発芽可能種子数を調べた嶺田・日鷹 (2002) も指摘している。さらに、V 溝直播水田ではコナギのサイズが小さかったことから、発芽後の生育条件も不良と推察された (伊藤浩二 未発表データ)。コナギの生育が悪かった原因としては、水田土壤の表面が硬いためコナギの幼根の定着が妨げられたこと (Matsuo and Shibayama 2000)、湛水開始期が遅いため発芽時期が遅延し、植物の生長や種子生産量が制約されたこと (片岡ほか 1979; 住吉ほか 2011) などが考えられる。

V 溝直播水田に適応しにくいと考えられる生物

V 溝直播水田は 4 月から 6 月中旬にかけて落水されるため、この時期に水中で繁殖・成育するアカネ属のトンボ類やカエル類などの生息には不適である可能性が高い。本調査では、初夏に出現する水生コウチュウのゴマフガムシ *Berosus punctipennis* やヤマトゴマフガムシ *Berosus japonicus* は、移植水田に比べ個体数が少なかった (Watanabe et al. 2013)。また、水田雑草にも V 溝直播水田には殆ど出現しない希少種 (ミズワラビなど) があった。これらの種の保全には V 溝直播水田は不適であり、とりあえずは慣行の栽培体系を継続していく必要があるだろう。

N 地区の V 溝直播水田では移植水田と併行して、8 月中旬に斑点米カメムシ類を対象として殺虫剤が散布された。8 月の殺虫剤散布は、夏繁殖の水生昆虫類に深刻な影響を与えうる (Katayama et al. 2015)。殺虫剤の施用時期による生物多様性への影響評価も今後の課題のひとつである。

結論と今後の課題

V 溝直播水田と移植水田に見られる生物群集の組成は、水生昆虫、水田雑草、稲株上の節足動物のいずれについても大きく異なっていた。したがって、一地域に V 溝直播と移植栽培が混在することは、水田に生息する動植物

のベータ多様性を高め、地域全体の動植物多様性の増進に寄与する可能性がある。しかし、今回は、両農法の水田を各4枚ずつ、1年間調査を行ったにすぎない。今後はV溝直播が水田の生物多様性に及ぼす影響について、異なる地域間での比較や、さらに中長期的な検討が必要である。たとえば、景観や地域ごとに水田生物の種プールは違うので、V溝直播が水田の生物群集に及ぼす効果も異なる可能性がある。また、水田雑草の植物相はある年の生育環境だけでなく、前年までに蓄積された土壌中の埋土種子集団の量や組成にも依存する。したがって、V溝直播導入の影響は長年にわたり徐々に顕在化する可能性がある。このように、V溝直播の影響評価には、本農法の導入後年数なども考慮し、生物群集の年次変化を調べる必要がある。

V溝直播の作型は、実施地域の地形や景観的特性、気候条件、土質や利水条件、病害虫・雑草を含む生物相、農家の経営実態などに応じて多様であろう。V溝直播が、生物多様性を増進する環境配慮型農法となり得るためには、これら地域特性を考慮し、それぞれの地域に適した農法として実践する必要がある。本稿で取り上げた石川県珠洲市N地区のV溝直播では、移植栽培と異なる生物群集構造を生じた原因として、中干しの不実施、湛水開始期の遅延、栽培初期の殺虫剤の無施用を挙げた。しかし、春先の気温が高い地域では、イネが播種から短期間で発芽するため湛水開始期が早まるであろう。また、栽培初期に病害虫が多発する地域では、V溝直播水田でも殺虫剤による初期防除が必要となる場合も想定される。さらに、冬期に降水量が少なく圃場が乾田化する地域では、冬期の土壌耕起が雑草の発生量に影響を及ぼすことが知られている(嶺田・沖1997)。このような地域では、冬期に代かきを行うV溝直播の耕起スケジュールが、圃場内で越冬する動植物の生存率に影響を及ぼす可能性も考えられる。このように、地域ごとの栽培体系のあり方によってV溝直播が水田の生物多様性に及ぼす影響を今後詳しく検討する必要がある。

筆者らの調査地である能登地方では、V溝直播が当初、省力化を目的として導入されたためか、農業者の生物多様性の保全をはじめとする環境配慮への目的意識は必ずしも高くない。今後、V溝直播と移植栽培の組み合わせによって生物多様性が増進するかどうかは、研究者による科学的検証とともに、農業者自身が農法と生物群集との関連を理解し、意識的に生物多様性に配慮するように取り組めるかにかかっている。経営と環境保全を両立させた栽培システムの構築に向けて、研究者が農業者との

協働体制をつくっていくことも重要である。

謝 辞

本稿をまとめるうえで貴重な意見を頂いた木村一也氏、V溝直播について議論を共に行った赤石大輔、宇都宮大輔、野村進也、細川一郎、渡部晃平の各氏、本特集記事での執筆の機会をいただいた西川潮、小関右介の両氏に厚くお礼申し上げる。本稿の一部は環境省地球環境研究総合推進費(D-0906)、文部科学省特別教育研究経費、科学研究費補助金(20380180、24780229)の助成によって行われた。

引用文献

- 愛知県農業総合試験場(2007)不耕起V溝直播栽培の手引き. 農業の新技术, 74. 愛知県農業総合試験場, 愛知
- 荒井 正雄, 宮原 益次(1956) 水稻の本田初期深水灌溉による雑草防除の研究. 日本作物学会紀事, 24:163-165
- Bloechl A, Koenemann S, Philippi B, Melber A (2010) Abundance, diversity and succession of aquatic Coleoptera and Heteroptera in a cluster of artificial ponds in the North German Lowlands. *Limnologia*, 40:215-225
- Farooq M, Siddique KHM, Rehman H, Aziz T, Lee D-J, Wahid A (2011) Rice direct seeding: experiences, challenges and opportunities. *Soil and Tillage Research*, 111:87-98
- Fujioka M, Lane SJ (1997) The impact of changing irrigation practices in rice fields on frog populations of the Kanto Plain, central Japan. *Ecological Research*, 12:101-108
- 濱田 千裕, 中嶋 泰則, 林 元樹, 釋 一郎(2007) 水稻における不耕起V溝直播栽培の開発—「冬期代かき」による栽培の安定化—. 日本作物学会紀事, 76:508-518
- Hayasaka D, Korenaga T, Sánchez-Bayo F, Goka K (2012) Differences in ecological impacts of systemic insecticides with different physicochemical properties on biocenosis of experimental paddy fields. *Ecotoxicology*, 21:191-201
- 日比 伸子, 山本 知巳, 遊磨 正秀(1998) 水田周辺の人為水系における水生昆虫の生活. (江崎 保男, 田中 哲夫 編) 水辺環境の保全—生物群集の視点から—, 111-124. 朝倉書店, 東京
- Hidaka K (1993) Farming systems for rice cultivation which promote the regulation of pest populations by natural enemies: planthopper management in traditional, intensive farming and LISA rice cultivation in Japan. *FFTC Extension Bulletin*, 374:1-15
- Hidaka K (1997) Community structure and regulatory mechanism of pest populations in rice paddies cultivated under intensive, traditionally organic and lower input organic farming in Japan. *Biological Agriculture and Horticulture*, 15:35-49

- 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, 48:167-178
- 日鷹 一雅 (2006) ただの虫の農生態学研究 1. (日本有機農業学会 編) いのち育む有機農業 (有機農業研究年報), 72-90. コモンズ, 東京
- 日鷹 一雅, 嶺田 拓也, 榎本 敬 (2006) 湿性植物RDB掲載種の水田農業依存性評価—博物館等の収蔵標本における採集地記載情報を用いた一事例から—. 保全生態学研究, 11:124-132
- 日鷹 一雅 (2010) いきものブランド“源五郎米”再生事業. (日本生態学会 編) 自然再生ハンドブック, 173-180. 地人書館, 東京
- 日鷹 一雅 (2012) ギルド構造から垣間見た水田群集の実際的食物網と潜在的な食物網. 日本生態学会誌, 62:187-198
- 樋口 博也 (2010) 斑点米被害を引き起こすカスミカメムシ類の生態と管理技術. 日本応用動物昆虫学会誌, 54:171-188
- Ishijima C, Taguchi A, Takagi M, Motobayashi T, Nakai M, Kunimi Y (2006) Observational evidence that the diet of wolf spiders (Araneae: Lycosidae) in paddies temporarily depends on dipterous insects. *Applied Entomology and Zoology*, 41:195-200
- 伊藤 千弘 (2011) 愛知県碧海地域における不耕起V溝直播栽培の普及過程. 地理学報告, 112:15-29
- 神宮寺 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
- Jinguji H, Thuyet DQ, Uéda T, Watanabe H (2013) Effect of imidacloprid and fipronil pesticide application on *Sympetrum infuscatum* (Libellulidae: Odonata) larvae and adults. *Paddy and Water Environment*, 11:277-284
- Kadoya T, Suda S, Washitani I (2009) Dragonfly crisis in Japan: a likely consequence of recent agricultural habitat degradation. *Biological Conservation*, 142:1899-1905
- Katano O, Hosoya K, Iguchi K, Yamaguchi M, Aonuma Y, Kitano S (2003) Species diversity and abundance of freshwater fishes in irrigation ditches around rice field. *Environmental Biology of Fishes*, 66:107-121
- 片岡 孝義, 金 昭年 (1978) 数種雑草種子の発芽時の酸素要求度. 雑草研究, 23:9-12
- 片岡 孝義, 児嶋 清, 古谷 勝司 (1979) コナギの生育と種子生産. 雑草研究, 24:86-91
- Katayama N, Saitoh D, Amano T, Miyashita T (2011) Effects of modern drainage systems on the spatial distribution of loach in rice ecosystems. *Aquatic Conservation. Marine and Freshwater Ecosystems*, 21:146-154
- Katayama N, Baba YG, Kusumoto Y, Tanaka K (2015) A review of post-war changes in rice farming and biodiversity in Japan. *Agricultural Systems*, 132:73-84
- Kimura M (2005) Populations, community composition and biomass of aquatic organisms in the floodwater of rice fields and effects of field management. *Soil Science and Plant Nutrition*, 51:159-181
- 桐谷 圭治, 中筋 房夫 (1977) 害虫とたたかう—防除から管理へ—. NHKブックス, 東京
- Kiritani K (2000) Integrated biodiversity management in paddy fields: shift of paradigm from IPM toward IBM. *Integrated Pest Management Reviews*, 5:175-183
- 小林 央往 (1984) 水田多年草雑草クログワイの生態と変異. 雑草研究, 29:95-109
- Koji S, Ito K, Akaishi D, Watanabe K, Nomura S, Utsunomiya D, Pei H, Tuno N, Hidaka K, Nakamura K (2014) Responses of aquatic insect, terrestrial arthropod, and plant biodiversity to the V-furrow direct seeding management in rice fields. In: Usio N, Miyashita T (ed), *Social-Ecological Restoration in Paddy-Dominated Landscapes*, 173-195. Springer, Tokyo
- Lawler SP (2001) Rice fields as temporary wetlands: a review. *Israel Journal of Zoology*, 47:513-528
- Leitão S, Pinto P, Pereira T, Brito MF (2007) Spatial and temporal variability of macroinvertebrate communities in two farmed Mediterranean rice fields. *Aquatic Ecology*, 41:373-386
- Matsuo M, Shibayama H (2000) Role of hypocotyl hairs in adhering strength and establishment of juvenile seedlings of *Monochoria vaginalis* to different seed beds. *Journal of Weed Science and Technology*, 45:190-199
- 嶺田 拓也, 沖 陽子 (1997) 雑草防除法, 耕起法および作付け様式の異なる水田における埋土種子の比較. 雑草研究, 42:81-87
- 嶺田 拓也 (2002) 水田耕作を利用する植物たちの多様性—農耕依存と雑草性のはざまで—. 琵琶湖研究所報, 21:123-130
- 嶺田 拓也, 日鷹 一雅 (2002) 水田雑草の湛水後初期発生に及ぼす耕起・代かきの影響. 雑草研究, 47 (Suppl.):232-233
- 嶺田 拓也 (2006) 「ただの草を無視しない農業」への一考—水田の絶滅危惧雑草を例として—. (日本有機農業学会 編) いのち育む有機農業 (有機農業研究年報), 91-104. コモンズ, 東京
- 嶺田 拓也, 石田 憲治, 廣瀬 裕一 (2006) 希少な沈水植物が生育する小規模ため池の環境特性と管理水準—香川県仲多度地方のため池を事例として—. 農業工学研究所技報, 204:43-52
- Mogi M (1993) Effect of intermittent irrigation on mosquitoes (Diptera: Culicidae) and larvivorous predators in rice fields. *Journal of Medical Entomology*, 30:309-319
- 森田 弘彦 (2011) 雑草防除. (農山漁村文化協会 編) 農業技術体系 作物編, 第2-1巻, 技402, 24-30, 農山漁村文化協会, 東京
- 守山 弘 (1997) 水田を守るとはどういうことか. 農山漁村文化協会, 東京
- 本林 隆, 源河 正明, Phong TK, 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, 56:169-172
- Muramoto J, Hidaka K, Mineta T (2010) Japan: finding opportunities in the current crisis. In: Gliessman SR,

- Rosemeyer M (ed), The conversion to sustainable agriculture: principles, processes, and practices, 273-302. CRC Press, Boca Raton
- 中川 昭一郎 (2004) 農村における自然環境劣化の要因と復元の方向. (杉山 恵一, 中川 昭一郎 編) 農村自然環境の保全・復元, 27-32. 朝倉書店, 東京
- 中井 謙, 鳥塚 智 (2009) 米ぬか土壌表面処理による水田雑草の抑草効果. 雑草研究, 54:233-238
- Natuhara Y (2013) Ecosystem services by paddy fields as substitutes of natural wetlands in Japan. *Ecological Engineering*, 56:97-106
- 根本 文宏, 平井 一男, 森田 弘彦 (2005) 防除ハンドブック 稲の病害虫と雑草. 全国農村教育協会, 東京
- 西原 昇吾, 荻部 治紀, 鷺谷 いづみ (2006) 水田に生息するゲンゴロウ類の現状と保全. *保全生態学研究*, 11:143-157
- 西条 洋 (2001) 島根県の水田と溜め池における水生昆虫の季節的消長と移動. *日本生態学会誌*, 51:1-11
- Sánchez-Bayo F, Goka K (2006) Ecological effects of the insecticide imidacloprid and a pollutant from antidandruff shampoo in experimental rice fields. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 25:1677-1687
- Schoenly KG, Justo HDJ, Barrion AT, Harris MK, Bottrell DG (1998) Analysis of invertebrate biodiversity in a Philippine farmer's irrigated rice field. *Environmental Entomology*, 27:1125-1136
- Settle WH, Ariawan H, Astuti ET, Cahyana W, Hakim AL, Hindayana D, Lestari AS, Pajarningsih (1996) Managing tropical rice pests through conservation of generalist natural enemies and alternative prey. *Ecology*, 77:1975-1988
- Shibayama H (2001) Weeds and weed management in rice production in Japan. *Weed Biology and Management*, 1:53-60
- 清水 矩宏 (1998) 水田生態系における植物の多様性とは何か. (農林水産省農業環境技術研究所編) 水田生態系における生物多様性, 82-126. 養賢堂, 東京
- Simpson IC, Roger PA (1995) The impact of pesticides on nontarget aquatic invertebrates in wetland ricefields: a review. In: Pingali P, Roger P (ed), *Impact of Pesticides on Farmer Health and the Rice Environment*, 249-270. KAP, London
- Suhling F, Befeld S, Häusler M, Kätzur K, Lepkojus S (2000) Effects of insecticide applications on macroinvertebrate density and biomass in rice-fields in the Rhône-delta, France. *Hydrobiologia*, 431:69-79
- 住吉 正, 小荒井 晃, 川名 義明, 牛木 純, 赤坂 舞子, 渡邊 寛明 (2011) 水稲作における難防除雑草の埋土種子調査法. 雑草研究, 56:43-52
- 武内 和彦 (2013) 世界農業遺産. 祥伝社, 東京
- 寺島 一男 (2012) 直播栽培の特徴と課題. (農山漁村文化協会 編) 最新農業技術 作物 vol. 4, 9-19. 農山漁村文化協会, 東京
- Washitani I (2007) Restoration of biologically-diverse floodplain wetlands including paddy fields. *Global Environmental Research*, 11:135-140
- Watanabe H (2011) Development of lowland weed management and weed succession in Japan. *Weed Biology and Management*, 11:175-189
- Watanabe K, Koji S, Hidaka K, Nakamura K (2013) Abundance, diversity, and seasonal population dynamics of aquatic Coleoptera and Heteroptera in rice fields: effects of direct seeding management. *Environmental Entomology*, 42:841-850
- 八木 健爾, 関岡 裕明, 渡邊 修, 嶺田 拓也, 鈴木 正貴, 吉岡 俊人 (2009) 異なる水位における土壌シードバンクからの水田雑草の発生. *日本緑化工学会誌*, 35:178-181
- Yin L, Wang C, Chen Y, Yu C, Cheng Y, Li W (2009) Cold stratification, light and high seed density enhance the germination of *Ottelia alismoides*. *Aquatic Botany*, 90:85-88