

圃場整備水田における止水域性トンボの保全と ミティゲーション対策に関する基礎的研究

若杉晃介

目 次

I 緒 言	1	1 水田の管理方法が生物多様性に与える影響	21
1 農村生態系と農業農村整備事業	1	2 水田のビオトープ利用の効果	22
2 農村の生態系保全	2	3 耕起・代かきがトンボの保全与える影響	24
3 水田農業とトンボについて	3	4 水深管理がトンボに与える影響	25
4 研究の構成と目的	5	5 まとめ	26
5 既往の研究	6	V 冬期湛水水田によるトンボ保全効果	27
II 圃場面の乾燥化がトンボ幼虫の生息に与える影響	8	1 冬期湛水水田とトンボの保全	27
1 水田の乾田化とトンボの生態	8	2 調査地概要及び調査方法	27
2 水田内におけるヤゴの生息状況	9	3 調査結果及び考察	28
3 ヤゴの耐乾燥・低温能力試験	11	4 冬期湛水水田におけるトンボ保全効果	29
4 まとめ	14	VI 結 言	30
III トンボの移動距離の測定	14	1 圃場整備事業が止水域性トンボに与える影響と 対策	30
1 トンボの移動距離について	14	2 圃場整備事業によるミティゲーション(回避)	30
2 標識再捕獲法によるトンボの移動距離測定	15	3 圃場整備事業によるミティゲーション(最小化)	30
3 アジイトトンボの移動距離	16	4 圃場整備事業によるミティゲーション(代償)	31
4 トンボの移動距離とビオトープ設置間隔	18	5 圃場整備事業へのミティゲーションに向けた 検討課題	33
5 シミュレーションによるトンボ移動距離の 推定	19	参考文献	34
6 まとめ	20	Summary	36
IV 水田の管理方法がトンボ保全に与える影響	21		

I 緒 言

1 農村生態系と農業農村整備事業

a 農村の生物多様性

日本の農村は水田農業を中心とした二次的自然によって成り立っている。小林ら(1973)によると昆虫やクモなどの節足動物門の調査で450種が確認されており、鳥類や両生類、魚類、植物についても多くの生物の存在が確認されている。そもそも、稲作の始まりは縄文時代の後期からといわれ、その頃は主に河川の氾濫原や自然湿地において耕作されており、守山(1997)によると水田に生息する生物の多くはそのような環境から水田環境に適応してきた生物であると考えられている。その後、灌漑技

術の発展とともに水田面積は増加し、それに伴って水田に生息する生物もその生息地を拡大してゆき、我が国独特の水田生態系を育んできたと考えられる。

しかし、1960年代以降の農業技術の近代化に伴って、農村の環境は大きく変わった。除草剤や殺虫剤などの農薬を多用する営農体系への変化やトラクターや田植機、コンバインといった農作業の機械化、農村の生活水準の向上や農業生産力や生産性の向上を目的に行われる農業農村整備事業などが主要因となり、農村の生物多様性は大きく低下した。

b 土地改良事業

①土地改良事業の変遷

戦後の食料不足に対処するため、昭和24年(1949)に土地改良法が制定され、農地の開拓や区画整理が本格的に始まった。昭和36年(1961)に農業基本法が制定され、昭和38年(1963)には、ほ場整備事業が創設され、それまで単独で実施されてきた区画整理・用排水・農道・暗

*農地基盤工学研究領域 水田高度利用担当

平成 23 年 12 月 22 日受理

キーワード：トンボ、ミティゲーション、圃場整備事業、生物
間ネットワーク、乾田化

渠排水などの事業を総合的に実施されることとなった。また、昭和 39 年(1964)に土地改良法が改正され、食料増産を目的とした事業から、経営規模の拡大や労働生産性の向上にその目的がシフトしていった。

昭和 45 年(1970)から米の生産過剰により減反政策が始まり、水稻から他の作物への転換が推奨されるようになった。その後、食料自給率の急速な低下や農村の過疎・高齢化といった問題を受け、平成 11 年(1999)に食料・農業・農村基本法(新基本法)が制定され、食料の安定供給の確保や農業の持続的な発展、農村の振興、多面的機能の発揮が農政の方向性として打ち出された。平成 13 年(2001)には土地改良法が改正され、これまで生産性重視で農村環境を整備してきた土地改良事業に環境との調和に配慮することが義務づけられた。

②ほ場整備事業の効果

ほ場整備事業では主に、小さく分散した水田を統合して大区画化にし、形状も作業性を考慮して長方形、または方形に整備する(**Fig. 1**)。これまで、30a 区画を標準区画としてきたが、近年では 1ha ～数 ha 規模の水田もみられるようになってきた。また、適切な水管理を行うため U 字溝やコンクリート護岸によって水路と排水路を整備し、大型機械の搬入ができるように農道の拡幅と舗装をする。さらに、多くの水田では水稻以外の作物が栽培できる汎用化水田にするため、暗渠排水管を整備し、水稻栽培のみを目的とした排水路よりも深い排水路を整備して地下水位を低下させる。暗渠排水の整備目標は「土地改良事業計画設計基準 計画 暗きょ排水」によると、水田の地表残留水が降雨後から 24 時間で解消されることとされており、このような整備がされることを乾田化と呼ばれている。

これらの整備をすることで、労働生産性や土地利用率は大幅に向上し、安定的な食糧供給や農家の所得安定に大きく寄与している。なお、平成 15 年からは場整備事業は、担い手の数の増加や農地利用集積を事業採択要件に加えた経営体育成基盤整備事業へと名称を変え、年間



Fig. 1 圃場整備事業
Field improvement project

約 1 万 ha のペースで実施されている。

2 農村の生態系保全

a ミティゲーションとは

ミティゲーションとは 1969 年にアメリカの環境アセスメントの中に位置づけられたもので、開発が行われる場合その行為によって環境に与える負荷をなくす為の行為である。これには、「回避」、「最小化」、「代償」という優先順位があり回避できるものは回避し、できなかったものは環境への負荷を最小化、または代償することによって環境への負荷をなくすことである(田中, 1998)。また、ミティゲーションには、事業による影響を受ける開発サイトに対して環境緩和措置を施す、オン・サイト・ミティゲーションと開発サイト以外の場所で環境保全に寄与する行為を行う、オフ・サイト・ミティゲーションがある。

ミティゲーションの原則はノー・ネット・ロスであり、環境への影響をゼロにすることを目的に行う。その影響を評価する方法として HEP(Habitat Evaluation Procedure)があり、生態系を野生生物のハビタット(生育・生息環境)としての適否から評価するもので、定量的な生態系評価手法として最も広く用いられている。評価手法は、生物種のハビタットの質を HSI(Habitat Suitability Index)という指標を用いて、事業前後の開発サイト及びミティゲーションサイトの環境価値となる HU(Habitat Unit)を算出するもので、事業前やミティゲーション対策時、事業完了後などの時系列ごとに実施することで、生態系の質及び空間的価値と時間的価値を定量的に評価することができる(田中, 1998)(**Fig. 2**)。また、ネット・ロスした HU とネット・ゲインした HU を比較することで、生態系回復が不可能な開発を事業前に防ぐ効果や、数量化することで開発と保全のあり方を明確にする効果がある。

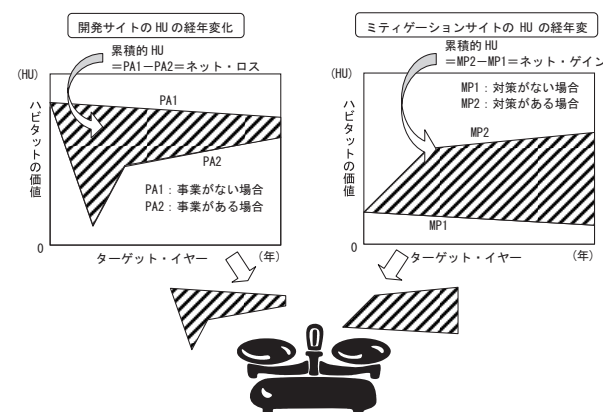


Fig. 2 開発サイトのネット・ロスとミティゲーションサイトのネット・ゲイン
Net loss in development sites and net gain in mitigation sites

b 農村地域におけるミティゲーション

圃場整備事業による生物多様性低下については、長谷川(1992, 1995)によりニホンアカガエルをはじめとする

両生類が圃場整備により減少していることが指摘され、日鷹(1998)もタガメについて同様のことを報告している。また、社会的な環境への関心の高まりなどを背景に土地改良法が改正され、事業の際には環境との調和に配慮することが義務づけられているが、事業による生態系への影響を精査しながら行った事例はほとんどない。

圃場整備事業のミティゲーションは、河川や水路といった流水域の環境では、希少種が生息する場合などは「回避」や「最小化」といった事例がみられ、河川の一部を保全したりしている。また、小河川と農業用水路、水田間のネットワーク化などの事例もみられ、その効果については藤咲(2000)や守山ら(2008)によって報告されている。「代償」に相当するものとしては魚道や井桁などの取り組みがされ、その効果については鈴木ら(2004)や高橋ら(2009)によってその効果が報告されている。また、水谷ら(2010)は圃場整備地区における HEP を用いたタモロコの具体的な評価を報告している。河川などの流水域は線的な空間のため、ネットワーク化しやすく、対象となる整備面積も小さいことからミティゲーションについて検討しやすいが、ミティゲーションの原則であるノー・ネット・ロスを目指した整備はされていないのが現状である。

一方で、止水域といった面的空間に対する環境へのミティゲーションについての事例はほとんどなく、圃場整備後に農村公園を造成したり、一部にビオトープを設置するといった代償に相当する行為が僅かに行われている。圃場整備事業は私的側面と協同的社会側面があり、生産物の増加や生産費の低減は私的な効果であるが、水利施設や道路などは社会的資本として位置づけられる。よって、事業実施には受益地域の農家の発意と関係農家の2/3の同意が必要で、公費の投入に加えて農家負担も伴うことから、ミティゲーションの「回避」によって事業を縮小するといったことは基本的に困難である。また、事業による効果を最大限に発揮するため「最小化」も多くの制約を受け、「代償」をする際にもオフ・サイト・ミティゲーションは困難であり、オン・サイトにおいて限られた面積で行うしかない。そのため、流水域に比べて止水域のミティゲーションに対する取り組みは少なく、限られた面積で効率よく「代償」する手法や整備後の水田を活用した新たなミティゲーションの考え方が必要である。

3 水田農業とトンボについて

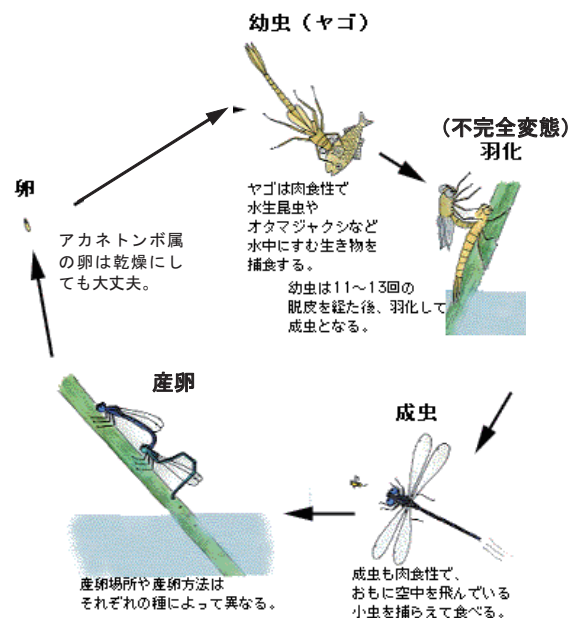
a トンボ目(蜻蛉目)の生態について

トンボ目(Odonata)は日本に14科83属181種14亜種生息し、種によって生息場所や生息時期が異なり、多様な環境に適応して生息している。トンボ目は均翅亜目、不均翅亜目、ムカシトンボ亜目の3つのグループに分類することができ、均翅亜目は前翅と後翅の大きさが同じグループで、イトトンボ科、モノサシトンボ科、アオイ

トトンボ科、ヤマイトトンボ科、ハナダカトンボ科、ミナミカワトンボ科、カワトンボ科がそれに属している。また、不均翅亜目は前翅よりも後翅の方が大きく、均翅亜目に比べて体つきも大きい種が多く、ムカシヤンマ科、サナエトンボ科、オニヤンマ科、ヤンマ科、エゾトンボ科、トンボ科が属する。ムカシトンボ亜目は前後の翅は同じ大きさであるが、不均翅亜目の特徴も持ち、三畳紀とジュラ紀の中世代に栄えた古代トンボと同じ特徴を持つ世界的にも稀な種であり、ムカシトンボ科ムカシトンボの1種のみが属する。

成虫は翅の発達した中形から大形の飛翔昆虫で、体の大きさに対して翅が大きく、大形のトンボ種は昆虫の中でも相当高い飛翔力をもつ。また、成虫は肉食性で、性的に未熟な時期(前生殖期)は水辺を離れて草地や樹林中で摂食し、成熟すると水辺に戻って繁殖活動を行う種が多い。産卵の方法や場所は種によって異なり、水草などの植物組織内に産み付ける方法や水面に生殖器をたたきつけて産み落とす方法などがある(Fig. 3)。

卵から孵化した幼虫は水中に生息し、不完全変態(さなぎにならずに幼虫から成虫へ変態)によって成虫となる。越冬形態は多くの種が幼虫で行うが、アカネトンボ属(赤トンボの仲間)等は卵で越冬する。また、成虫と同様に肉食で、幼虫の呼吸はトンボ亜目では直腸気管鰓で、イトトンボ亜目では尾端にある3個の葉状の尾鰓で行われる。



出典：農林水産省 HP、農村地域の水辺の生き物（一部改変）

Fig. 3 トンボのライフサイクル
Life cycle of the dragonfly

b トンボ幼虫の生態について

①幼虫の生息場所

トンボ幼虫の生息場所は、河川や用水路に生息する流水域タイプと水田やため池に生息する止水域タイプに大

別できる。それらは主に成虫の産卵場所によって決められ、科ごとに分類すると、流水域の植物組織内や河床の砂に産卵するカワトンボ科やムカシトンボ科、ムカシヤンマ科、サナエトンボ科、オニヤンマ科の幼虫は流水域に生息する(山本ら, 2009)。また、水田や休耕田、湿地やため池といった止水域に生息する種はイトトンボ科やアオイトトンボ科、モノサシトンボ科、ヤンマ科、エゾトンボ科、トンボ科の種であり、乾田化の影響を最も受ける種であると思われる。

②幼虫の生活様式

幼虫の生活様式は水底に潜るタイプと水草や岩につかまるタイプに大別できる(石田ら, 1988)。それぞれ、産卵される場所によって異なり、植物組織外に産卵された種の幼虫は水底に潜るタイプで、植物組織内に産卵された種の幼虫は水草などにつかまるタイプとなる。

水底にもぐるタイプはサナエトンボ科、オニヤンマ科、エゾトンボ科、トンボ科、ムカシヤンマなどで、植物や岩につかまって生活しているタイプは均翅類(イトトンボやカワトンボの仲間)、ムカシトンボ、ヤンマ科などである。

③越冬形態

トンボ科アカネトンボ属(赤トンボの仲間)は卵で越冬し、オツネトンボとホソミオツネトンボは成虫で越冬する。それ以外の多くの種は幼虫で越冬する。なお、幼虫の期間は種によって異なり、オニヤンマは2～3年、ムカシトンボは5～7年の間、ヤゴの状態で見守る(石田ら, 1988)。また、1年に2回世代交代するアオモンイトトンボは50～261日間と1世代目と2世代目で大きく異なり、1年多世代型(1年間に世代が数回生まれ変わる)のウスバキトンボは40日間と短い(山本ら, 2009)。

④ヤゴの移動手段

ヤゴの移動手段として、トンボ科やヤンマ科などの不均翅亜目のヤゴは肛門から水をジェット噴射させて瞬間的に一定距離で移動することができる。また、イトトンボ科などの均翅亜目は体全体をよじらせて泳ぐように水中を移動することができる。しかし、これらの移動手段は主に天敵から逃れる際に用いるものであるため、基本的な移動は歩行によって行われる。そのため、産卵された水田から他の水田、または自然湿地やため池などに移動するのは困難である。

c トンボ目の分類

トンボ目を生息場所に注目して分類すると、主に止水域に生息する止水域性トンボと流水域に生息する流水域性トンボに大別される(Fig. 4)。止水域性トンボは、低平地地帯や中山間地帯の水田に生息するアカネトンボ属やシオカラトンボといった種と、山間地帯に生息するルリボシヤンマやオオヤマトンボといった種に分類できる。また、流水域トンボは、流れの速さによって分布が異なり、それぞれ上流域や中流域、下流域に適した種が生息し、下流域に生息する種の一部は止水域にも生息する。特に、ヒメマイトトンボのようなごく一部の種は汽水域にも生息が可能であり、多様な水辺環境に適した種がそれぞれ生息している。

本研究では、圃場整備事業の影響やそれに対する保全対策を検討するため、止水域性トンボの中でも水田地帯に生息する約40種のトンボ種を対象に調査を行った。

d トンボの保全と生物多様性について

水田に生息するトンボ類は水田農業の歴史と共に、長い年月をかけて水田という場所を生息地として適応させてきた。トンボの語源は「飛ぶ穂」ともいわれ、豊作を

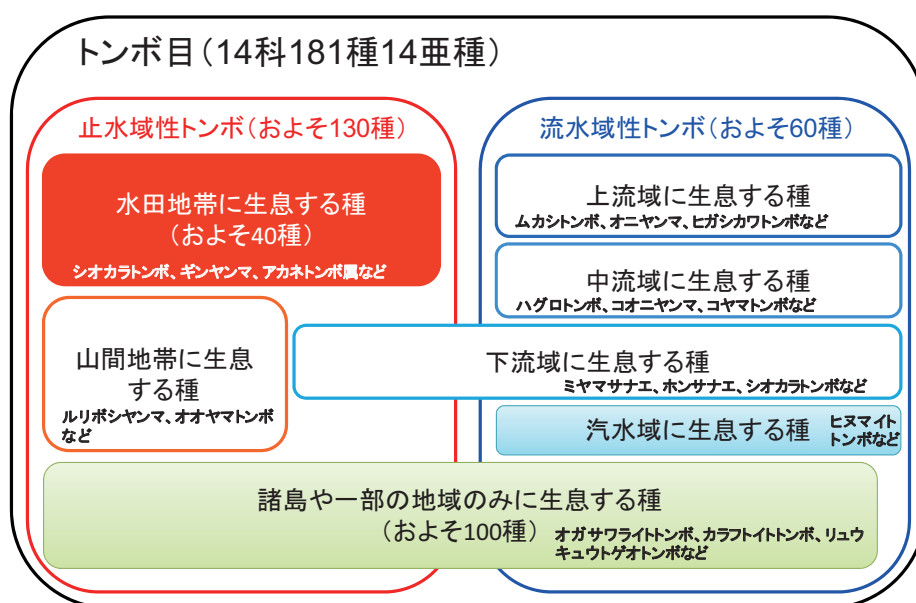


Fig. 4 トンボ目の分類
Classification of the order Odonata

祈念する縁起の良い虫として知られており、童謡「赤とんぼ」に哀愁を感じるように、我々日本人にとって馴染み深い生き物である。さらに、害虫を駆除する益虫としても知られており、日本の農村にとってなくてはならない生き物である。一方で、桐谷(1998)によると、従来の害虫と益虫のみを管理する総合的有害生物管理(IPM)から、安定した生態系を活用した総合的生物多様性管理(IBM)への転換の必要性を指摘しており、トンボを含めた多くの生物の保全をすることで害虫の大発生を抑制したり、農薬の散布量を減少させることが可能となる。

また、生物の存在や生息状況によって環境の質や変化をみる方法を「生物指標」といい、このために用いられる生物を「指標生物(指標種)」という。生物の中にはいろいろな環境に適応して生息可能な種もあれば、特定の環境に強く結びついている種も多くいる。このような種の生息状況を調べることで、その場所の環境状態を知ることが可能となるが、トンボは生物多様性を示す指標生物としても優れた生物である。その理由として、①環境の変化に対する生態学的な知見の集積、②統計的に変動がわかるだけの生息数、③種の同定が容易で調査し易い、④一年を通じて採取され、モニタリング調査し易い、⑤一生涯を通じて肉食であるといったことが挙げられる。これらのことから、より多くのトンボ種を保全することは、生物多様性の確保、及び営農上においても重要であるといえる。

e トンボの減少と保全について

1991年に公表されたレッドデータブック(環境省)によると、トンボは絶滅危惧種に2種、希少種に39種が記載されたが、2000年にその見直しが行われ、絶滅危惧種Ⅰ類に10種、絶滅危惧種Ⅱ類に10種、準絶滅危惧種に18種となっている。その他にも県や市町村での絶滅危惧種や天然記念物に指定されている種も多い(ハッチョウトンボは富山県、京都府、栃木県宇都宮市等の天然記念物)。絶滅危惧種などに指定された種の多くは、元々限られた地域のみに生息する希少種と呼ばれるタイプであるが、特に近年問題となっているのは、アキアカネやナツアカネ、イトトンボ、ギンヤンマなど水田周りに当たり前のようにいた普通種と呼ばれるタイプが減少してきていることである。

新井(1996)や上田(1998)は近代化された農法の変化や圃場整備事業による水田の乾燥化がトンボの減少を招いていると指摘している。特に、上田(2008)によるとアキアカネが近年急激に減少しつつあると報告しており、その原因として、神宮字ら(2009)はいもち病やイネミズゾウムシなどの害虫を防除する育苗箱施用の農薬として、近年多用されているフィプロニル系農薬によって激減していると報告している。また、Kadoyaら(2009)は過去の個体数や生息地の減少率、生存率などから絶滅リスクを評価する個体群存続可能性分析(PVA: Population Viability Analysis)を行い、トンボの中でも止水域かつ広範囲に生息する種が最も絶滅のリスクが高いと指摘している。これは水田地帯に生息するトンボ種のことを指し、これらの種を対象としたミティゲーションが行われないと絶滅へと向かう可能性が高いことが示された。

4 研究の構成と目的

a 圃場整備事業における止水域環境のミティゲーション

圃場整備事業は区画整備や暗渠排水整備、及びそれに付随した深い排水路整備などを一体的に行う(Fig. 5, 6, 7)。圃場整備事業が水田を主な生息場所とする止水域性のトンボに与える影響は、事業の実施そのものによる生息空間の破壊や止水域環境のネットワークの分断、事業後の乾田化の進行などがあげられる。そのため、事業の影響を効果的に緩和、解消するにはミティゲーションの考え方を取り入れた保全対策が必要となる。

そこで、ミティゲーションにおける「回避」に相当するものとしては、一部の湿地環境を保全することが想定される。特に絶滅危惧種の生息地や種の供給源となるホット・スポットのような場所は整備の影響を受けないように保全する必要がある。また、「最小化」に相当するものとしては、生態系への負荷の少ない工法などを取り入れるといったことが想定される。「代償」に相当するものとしては、ビオトープの整備やネットワーク化、環境に優しい営農技術があり、近年は農地・水・環境保全向上対策を契機に各地で取り組みが行われてきている。

b 研究の構成と目的

本研究では区画整理や、暗渠排水整備を伴う圃場整備



Fig. 5 区画整備による表土扱い工法
Topsoil handling method by field division improvement



Fig. 6 暗渠排水整備
Subsurface drainage improvement



Fig. 7 排水路整備
Drainage channel improvement

時、及び整備後の乾田化の影響を調べるため、トンボ幼虫(ヤゴ)の乾燥に対する能力や乾田状態での生息状況について調査する(**Fig. 8**)。また、止水域環境のネットワーク分断の影響について、種の供給源となるトンボ成虫の移動距離を調べることで明らかにし、圃場整備事業が止水域性トンボの生息に与える影響について把握する。なお、これらの調査結果はミティゲーションにおける「回避」、「最小化」においても重要な知見となる。また、同様に代償ミティゲーションに有効な手段とされる水田のビオトープ利用といった水田の管理方法や環境に配慮した営農技術の効果をトンボの生息状況調査から検証し、圃場整備をした水田における効果的なトンボ保全技術を検討する。最終的にこれらの結果を圃場整備時におけるミティゲーション導入に向けた基礎的な知見として集積

すると共に、過去の知見なども活用した効果的なミティゲーション手法を提案することを目的とした。

5 既往の研究

a トンボの生活環

トンボの越冬形態は、アカネトンボ属(赤トンボの仲間)では卵、オツネトンボといったごく一部の種は成虫であるが、多くの種は幼虫(ヤゴ)で越冬する。上田ら(1998)によると、繁殖時期や回数といった生活環(ライフサイクル)によって分類でき、春から夏に羽化をする春種(SP)、夏に羽化・産卵をする夏種(SM)、秋に産卵をする秋種(AT)、また年に数回世代交代する多化性種(DV)、さらにオツネトンボのような成虫越冬種(WT)の5つに大別することができる(**Fig. 9**)。なお、本研究では、水田

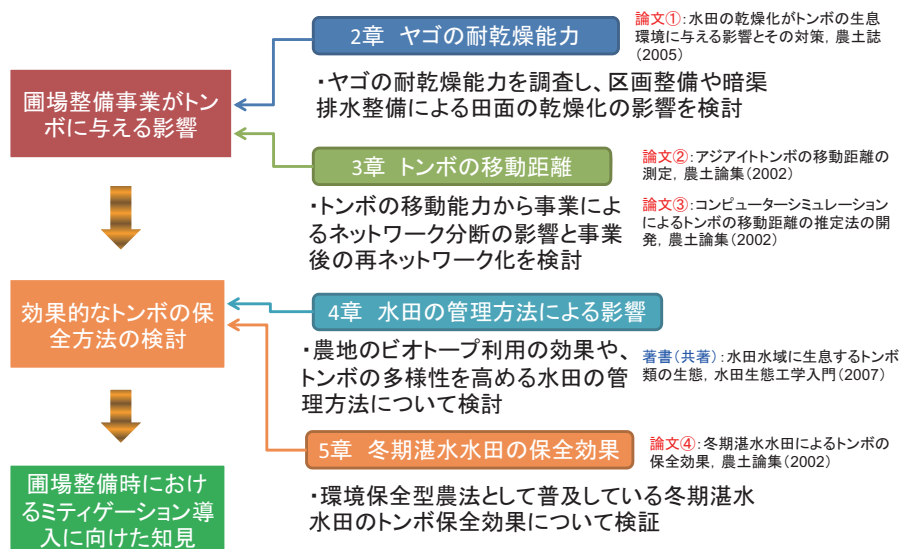


Fig. 8 研究の構成
Composition of the research

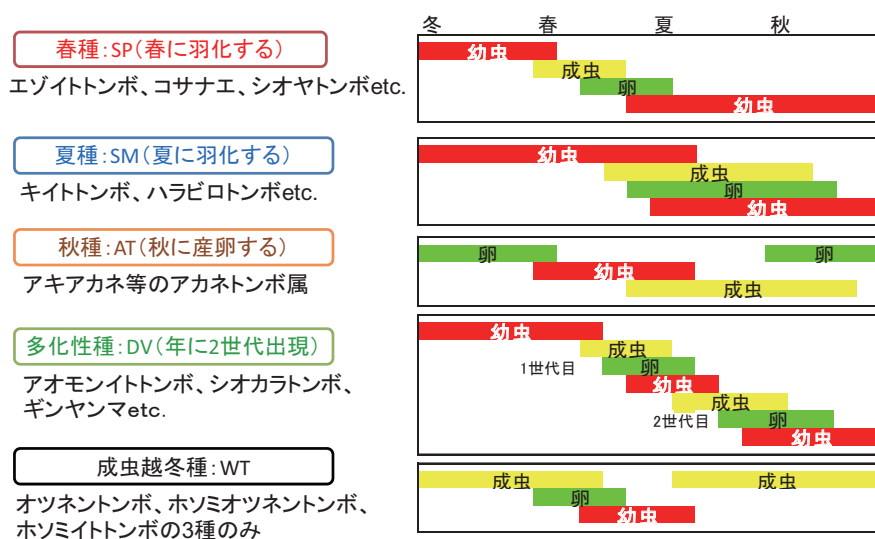


Fig. 9 トンボの生活環 (ライフサイクルパターン)
Life cycle of the dragonfly (life cycle pattern)

地帯に生息する止水域性トンボ(約 40 種)の保全対策について、これらの生活環を用いながら検討を行う。

b トンボ幼虫の乾燥と低温に対する耐性について

一般的にトンボ幼虫は乾燥や寒さに弱いとされる。乾燥や寒さの適応能力については、新井(1986)の報告によると、アカアカネは産卵直後は乾燥に弱い、産卵後 20 日程度経過すると乾燥の抵抗力がつく。その他のアカネトンボ属については、乾田状態においてもアカアカネやナツアカネ、ミヤマアカネ、マユタテアカネといった種の羽化を確認している。卵越冬する種以外の知見として、冬場に水面のなくなる湿地においてハラビロトンボやルリボシヤンマ、キイトンボが乾燥や寒さに強く、モートンイトンボやアジアイトンボ、オオイトンボ、クロスジギンヤンマも水面復活後に採取されたという報告がある(新井, 1983)。これら種は土中に潜ることができないタイプのため、植物の枯れ株の中や堆積した落ち葉の中に潜っていた。

また、同様に冬場に干上がる湿地環境において、クロスジギンヤンマやショウジョウトンボ、ヨツボシトンボが乾燥と低温が原因とみられる死体を確認しており、水面の回復後もクロスジギンヤンマ、ギンヤンマ、ルリボシヤンマ、ショウジョウトンボ、ヨツボシトンボ、キイトンボ、シオカラトンボの生息は確認されなくなった。一方で、地割れするぐらいに乾燥してもハラビロトンボの幼虫の生息が確認された(新井, 1984)。

しかし、これらの報告は湿地におけるもので、自然湿地は降雨や地下水によって元々湿潤環境になりやすく、人工的に乾燥させた乾田とは状況が異なる。また、乾田下における定量的なデータや土壌水分と生息状況についての知見はこれまでになく、水田の生物多様性を維持するためには乾燥に弱い種における知見が重要となる。

c トンボ成虫の移動距離

トンボの移動距離についてはすでに幾つかの報告がある。守山ら(1990)は、特定の繁殖地からトンボがどれくらい離れた所まで飛来しているかを調べることで、オオイトンボ、アジアイトンボについて 1.2 ~ 1.3km、ショウジョウトンボについて 1.0 ~ 1.1km を、それぞれの移動距離と推定した。しかし、これらは推定値でありトンボが確実に繁殖地から移動していることの証明にはなっていない。

また、アカアカネは羽化してから性成熟するまでに大移動をすることが、田中(1983)や馬場(1986)の標識再捕獲法によって明らかになっており、盛夏の頃は山間地に移動し、産卵期の秋口になると水田地帯に戻ってくる。他にも、標識再捕獲法を用いた研究としては、田口(1997)によるアカネトンボ属の 1 日の飛翔距離について詳しい調査がある。

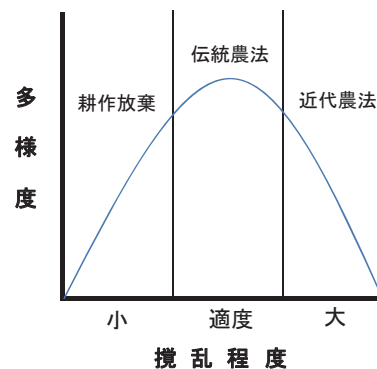
d 農作業がトンボに与える影響

①農法と生物多様性の関係

日本独自の水田生態系(二次的自然)は農作業による人

為的攪乱(耕起や水の出し入れ、施肥による肥沃化、雑草防除、冬期の休耕など)が一定の範囲で長年にわたり持続的行われたことで形成された。これらの生物にとって、過度の乾田や除草剤、殺菌・殺虫剤の多用などを行う近代農法は攪乱程度が大きく多様度を低下させてしまう(Fig. 10)。一方で、攪乱程度がほとんどない耕作放棄水田では肥沃度が低下し、乾燥化や植生遷移が進んでしまうことで同様に多様度が低下する。しかし、伝統農法への回帰は現実的に不可能であり、桐谷(1998)は農薬に頼らない総合的有害生物管理(IPM)、さらには害虫管理と生物多様性を包括した総合的生物多様性管理(IBM)を提唱している。また、生物多様性国家戦略(2010, 環境省)においても、生物多様性をより重視した農業生産として、有機農業をはじめとした環境保全型農業を推進することが必要としている。

既に普及している代表的な環境保全型農業としては、アイガモ農法や冬期湛水水田といった技術がある。アイガモ農法については、木村ら(1999)によるアイガモによる除草効果は高いが、トンボの餌となるユスリカはアイガモの捕食により少なく、結果としてトンボも少なかった。また、岩淵ら(2001)によると冬期湛水水田の実施によって、ガン類やハクチョウなどの水鳥の保全効果や、水鳥による除草・施肥効果があることが報告されているが、生物多様性に与える影響、特にトンボの保全効果については未知の部分が多い。



出典：農林水産省農業環境技術研究所(1998)

Fig. 10 農耕地における攪乱と種多様性の関係

Relationship between crop land disturbance and species diversity

②農薬がトンボの生息状況に与える影響

1950年代から多用されたBHC、DDT(1970年代には使用が禁止)を代表とする有機塩素系農薬によって水田生態系は大きな打撃を受けた。また、西内ら(1978)によると有機リン系殺虫剤がシオカラトンボ、ギンヤンマへ強い毒性を示すことが報告されている。石田ら(1992)はキイトンボ、クロイトンボ、モノサシトンボ、アオイトンボ、オニヤンマ、タカネトンボ、マユタテアカネ、チョウトンボの8種のヤゴが除草剤、殺菌剤、殺虫剤による致死率を調べ、除草剤ではクロイトンボ、

アオイトトンボの感受性が高く、殺菌剤ではすべての種で高い感受性はみられず、殺虫剤では有機リン系殺虫剤 MEP 濃度 40% (商品名: スミチオン水和剤 40) によって全ての種は全滅し、カーバメイト系殺虫剤 NAC 濃度 50% (商品名: ミクロデナポン) も同様に全ての種に対して高い致死率を示したが、カーバメイト系殺虫剤カルタップ濃度 50% (商品名: パダン水和剤) ではアオイトトンボ、オニヤンマ、マユタテアカネが高い致死率を示した。

近年は毒性の低い農薬になっているが、生涯肉食であるトンボ類は害虫の減少が餌資源の減少に繋がることから個体数を減少させる要因になっていると思われる。特に近年では、いもち病やイネミズゾウムシなどの害虫を防除する育苗箱施用の農薬として、多用されているフィプロニル系農薬はアキアカネの個体数を激減させるとの報告がある (神宮宇ら, 2009)。

③農作業 (耕起・代かき) がトンボの生息状況に与える影響

不耕起や無代かき栽培は代かきによる濁水を流出しないことから環境に負荷を与えない栽培方法として注目されており、滋賀県の琵琶湖周辺や秋田県の八郎潟周辺で積極的に行われているが、表土の攪乱を抑えることからヤゴの保全にも寄与すると考えられる。神宮宇ら (2006) によると、不耕起栽培と無代かき栽培を行う水田においてアカネトンボ属の羽化殻調査を行い、不耕起栽培では通常の栽培方法に比べて主にノシメトンボが多く羽化し、無代かき栽培ではノシメトンボ、アキアカネ、ナツアカネが多く羽化するとの報告がある。

II 圃場面の乾燥化がトンボ幼虫の生息に与える影響

1 水田の乾田化とトンボの生態

a 乾田化の影響について

農村に生息する水生動物の多くは水田を産卵や幼虫・稚魚の成育、採餌場所としており、一時的または一生の生息場所となっている。トンボ目の幼虫は水中で生息し、成虫になると陸上で生息する。成虫では大きい 4 枚の羽で移動できることから、生息する環境が悪化しても移動することは容易いが、幼虫は移動するための手段をほとんど持っていないことから生息環境が悪化した際の脱出手段がない。

圃場整備前の水田の多くは湿地もしくは半湿地状態であったが、整備中の表土扱い工法による表土の攪乱、及び整備後は大型化した農業機械の走行や田畑輪換を可能とする整備によって乾田化され、非灌漑期の土壌水分は極めて低くなっている (Fig. 11)。また、水生動物の生息に欠くことができない用水の取水期間は水利権によって定められており、河川法施行以前から利用している農業用水については慣行水利権と称し、届け出をすれば通年



Fig. 11 乾田化した水田 (茨城県つくば市)
Dried out paddies (Tsukuba, Ibaraki Prefecture)

の取水が可能となるが、それ以外は許可水利権と称し、水稻の灌漑期のみ取水しか許可がされていない。なお、これまで慣行水利権であった地区においても、灌漑施設の改修等に伴って許可水利権に変更されることも多くあり、ほとんどの水田地帯では非灌漑期は取水できない許可水利権になっている。これらのことが一因となって、水生動物の生息地が激減し、農村地帯の生物多様性は大きく低下していると思われる。

本研究では、乾田化した際のトンボ幼虫の生息状況を定量的に調査することで乾田の影響を把握するとともに、そのトンボ幼虫の乾田化に対する能力を精査することによって、乾田化に対する保全方法を考察する。

b 圃場整備事業による表土扱い工法

圃場整備による区画整理は、表土扱い工法によって地力の高い作土 (表土) と下層の心土を区別して扱うのが一般的である。不整形で小さい区画を 30a 以上の区画に拡大・整形するには、数筆の水田の統合や、区画のレイアウトを変える必要がある。その際、表土をはぎ取って、心土によって運土・整地をしないと地力のムラが生じたり、心土が露出して排水不良を起こしてしまう。そのため、表土は心土による運土・整地の間、仮置き場に山積みされ、整地が終わってから水田に戻される。

また、工事は農家の営農への影響を最小限にするため、水稻収穫後の農閑期に行われることから、表土に多くのトンボ種の卵や幼虫が生息する状態で、整備時の攪乱と仮置き時の乾燥の影響を受ける。

c 暗渠排水整備による乾田化

①暗渠排水の目的

暗渠排水は地表残留水及び過剰な土壌中の重力水を排除することを目的に施工される。近年、需要が高まっている汎用化水田では、転作時の湿害を防ぐために不可欠な施設となっている。また、水稻栽培時は春先の耕運作業や収穫前の落水の際、迅速な排水により地耐力を向上させ、大型機械の搬入を可能とする。

暗渠排水に依存すべき過剰水の排除に要する目標時間としては、水稻作の場合、機械の導入や適正な水管理のため、1~2日以内としなければならないとされている (農水省, 2000)。また、転作の場合には1日以内の排除を

原則としている。計画暗渠排水量の算定にあたっては計画基準雨量を 1/10 年確率の 4 時間雨量とし、これに暗渠排水依存率を乗じた量を 4 時間で排水することを目標としている。一般的には水稻作付水田では 20～30mm/d、転作田では 30～50 mm/d の暗渠排水量となるように計画される。

②暗渠排水の構造

暗渠排水は暗渠溝を掘削し、掘削した溝に吸水管と疎水材を埋設し、作土となる土壌を埋め戻す (Fig. 12)。吸水管は地下 70cm (一般的に、暗渠の長さ 100m の場合、上流端 -60cm, 下流端 -80cm, 勾配 1/500) に埋設され、その上部に管内に土砂が入らないようにフィルタの役割を果たすためのモミガラなどの疎水材を充填する。また、

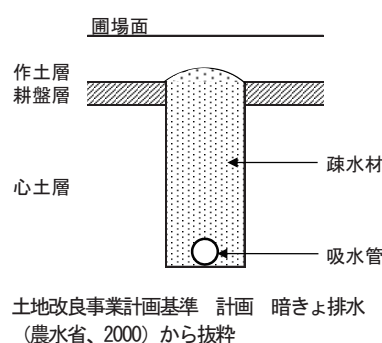


Fig. 12 暗渠排水の断面
Cross-section of subsurface drainage

吸水管の間隔は 7.5m を下限値とし、おおむね 10m 間隔で施工されることが多く、短辺 30m × 長辺 100m の 30a 区画圃場では、長辺方向に 3～4 本の暗渠排水管が施工されることとなる (Fig. 13)。

③地耐力

地耐力とは農業機械が圃場を走行する際の地盤が支えることができる力のことで、暗渠排水を利用して地下水位を低下させることで、地耐力は向上する。労働生産性や作物の適期適作を考慮すると、降雨などの後は速やかに圃場にトラクターなどによる機械作業が可能となることが望ましい。必要とされる地耐力の目安としては、トラクター (ゴム車輪) で 0.39N/mm² 以上、コンバインで 0.29 N/mm² 以上が必要とされている (Table 1)。



Fig. 13 暗渠排水の施工状況
Installation of subsurface drainage

Table 1 農業機械の走行性とコーン指数との関係
Relationship between drivability of farm machinery and cone index

走行性判定	トラクター (耕耘)		コンバイン (収穫)
	ゴム車輪	ガードル装着	セミクローラ
走行容易	0.39 以上	0.29 以上	0.29 以上
走行やや難	0.29～0.39	0.20～0.29	0.20～0.29
走行 難	0.20～0.29	0.10～0.20	0.10～0.20
走行不能	0.20 以下	0.10 以下	0.10 以下

(単位 N/mm²)

土地改良事業計画設計基準 計画 (圃場整備 (水田) (農水省、2000) から抜粋

2 水田内におけるヤゴの生息状況

a 調査地及び調査方法

①調査地

茨城県つくば市にある、(独)農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所内でビオトープとして利用している 2 筆の水田を用いて、それぞれ通年湛水管理と冬期落水管理を行った (Fig. 14)。通年湛水ほ場は造成時 (2000 年 4 月) に一部植生の移植を行ったが、冬期落水ほ場は自然遷移とした (Fig. 15)。冬期落水ほ場の湛水期間は 4 月下旬から 10 月上旬である。両ほ場の土壌は重粘土であり、コンクリート壁で四方を囲み、かつ有底 (深さ 2m) で水密性が確保され、水中の生物間の移動はない。また、各々で独自の水管理を行うことができる。なお、

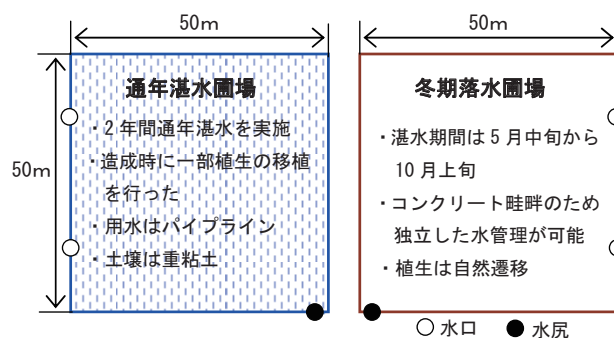


Fig. 14 調査圃場の概要と管理方法
Outline of surveyed fields and method of management

湛水時の水深は両ほ場共に 10cm 程度とした。

②調査方法

調査は各圃場において 50 × 50cm のコドラート(木枠)を 10 地点設定し、その中のヤゴを 2mm 目の手網で採取し、アルコールに液浸した後に同定を行った(Fig. 16)。コドラートの設置箇所は毎調査で異なり、圃場内を 5 等分した 10m × 50m の範囲でランダムに 2 地点を選び、合計 10 回行った。また、冬期落水圃場における落水期間はコドラートを 5 地点設定し、その中の土壌を表層からグライ層が出るまでの深さ約 10cm 分をサンプリングし、土中にいるヤゴを採取した(Fig. 17)。調査は 2002 年 6 月～03 年 6 月まで月 1 回(全 13 回)の割合で行った。今回調査方法として用いたコドラート法とは、ある一定面積の枠を用いて、枠内の生物を採取して、定量的に調査する方法である。主に底生生物や水生昆虫などの調査に用いられ、枠の大きさは調査対象に応じて変化する。

b 調査結果

通年湛水したほ場ではイトトンボ科 4 種、シオカラトンボ、ショウジョウトンボ、ギンヤンマ幼虫の越冬が確認された。非灌漑期となる 10 月以降の個体数はアオモンイトトンボで減少傾向となったが、それ以外の種は大きな変動はなかった。また、卵越冬するアキアカネも孵化後の 5 月以降に幼虫で採取された(Table 2)。一方、冬期落水ほ場は落水前に 5 種のヤゴを確認したが、落水後はイトトンボ科やギンヤンマ幼虫は採取できなくなった。特にギンヤンマ幼虫は田面に干涸らびた状態で死んでいるのを確認することができた(Fig. 18)。また、シオカラトンボ幼虫は個体数が減少したが湛水していても生息していることを確認した(Table 3)。

アオモンイトトンボなど水田に生息するイトトンボやシオカラトンボは 1 年に 2 世代出現する DV 種(Fig. 9)であり、本調査地においてもそれぞれ 5～6 月と 8～9 月に羽化を始めていた。通年湛水ほ場ではヤゴが一年中採取されていることから 2 世代とも繁殖していると思われる。一方、冬期落水ほ場では 6 月から落水する 10 月まで採取されていることから、第 2 世代は繁殖していると思われる。

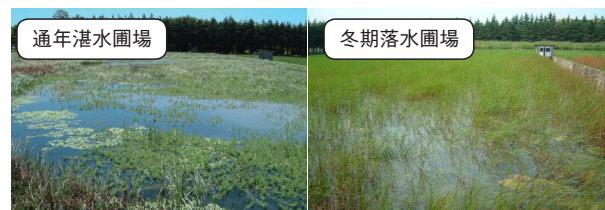


Fig. 15 調査圃場の状況
State of surveyed fields

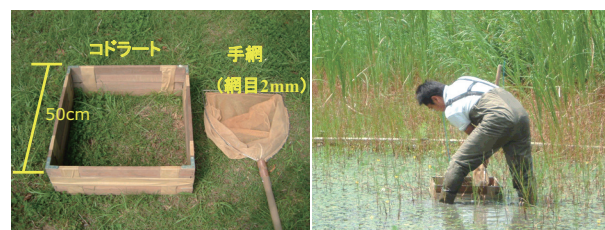


Fig. 16 コドラート法による調査状況
State of survey using the quadrat method



Fig. 17 冬期落水圃場の調査状況(落水時)
State of survey on winter ponding fields (when ponding)



Fig. 18 乾田状態におけるギンヤンマ幼虫の枯死
Withered *Anax parthenope julius* larvae in a dry paddy state

Table 2 通年湛水水田におけるヤゴの生息状況
Living conditions of dragonfly larvae in permanently flooded paddies

		生活環	2002						2003						
			6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月
アジアイトトンボ	<i>Ischnura asiatica</i>	DV			1.2				0.4		0.4	0.4	1.6		0.4
アオモンイトトンボ	<i>Ischnura senegalensis</i>	DV	13.2	12.0	20.8	30.0	57.6	17.2	20.8	8.0	11.2	8.4	14.0	8.8	8.4
キイトンボ	<i>Ceragrion melanurum</i>	SM	0.8	0.8	2.8				0.8			0.4		1.6	2.8
オオイトトンボ	<i>Cercion sieboldii</i>	DV	0.4	1.6		2.4			1.6	0.4					0.8
イトトンボ科s.p.	<i>Coenagrionidae</i> Munz s.p.		5.2	2.4	6.8	14.0	32.0	1.2	1.6	1.6		2.0	1.2	0.4	0.8
アキアカネ	<i>Sympetrum frequens</i>	AT												0.2	0.2
シオカラトンボ	<i>Orthetrum albistylum speciosum</i>	DV			4.4	15.2	2.4	1.6	2.4	2.4	4.0	2.8	8.4	7.6	3.6
ショウジョウトンボ	<i>Crocothemis servilia mariannae</i>	DV			1.6	1.2		0.4					0.4		
ギンヤンマ	<i>Anax parthenope julius</i>	DV			4.4	15.2	2.4	1.6	2.4	2.4	4.0	2.8	8.4	7.6	3.6
※イトトンボ科s.p.は採取の際に尾鰭が損傷し、科までの同定			空欄は採取数ゼロ						(個体数／㎡)						

※イトトンボ科 s.p. は採取の際に尾鰭が損傷し、科までの同定

空欄は採取数ゼロ

(個体数/㎡)

Table 3 冬期落水水田におけるヤゴの生息状況
Living conditions of dragonfly larvae in winter ponding paddies

		生活環	2002								2003					
			6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	
アジアイトトンボ	<i>Ischnura asiatica</i>	DV			0.4											
アオモンイトトンボ	<i>Ischnura senegalensis</i>	DV	0.4	7.6	7.2	28.8	17.2	落水期間								
キイトンボ	<i>Ceragrion melanurum</i>	SM			0.4	0.8										
オオイトンボ	<i>Cercion sieboldii</i>	DV				0.8	2.8									
イトトンボ科s.p.	<i>Coenagrionidae Munz s.p.</i>		0.4	4.4	4.8	32	13.6									
ノシメトンボ	<i>Sympetrum infuscatum</i>	AT	3.2													
アキアカネ	<i>Sympetrum frequens</i>	AT	4.8												0.8	
ナツアカネ	<i>Sympetrum darwinianum</i>	AT	1.6	0.4												
シオカラトンボ	<i>Orthetrum albistylum speciosum</i>	DV			13.6	44	20.8	0.8	0.8	0.8	1.6		0.8			
ショウジョウトンボ	<i>Crocothemis servilia mariannae</i>	DV		8.8	6	25.6	9.6								0.8	
ギンヤンマ	<i>Anax parthenope julius</i>	DV		1.2	4.8	44	10.4									
※イトトンボ科s.p.は採取の際に尾鰭が損傷し、科までの同定			空欄は採取数ゼロ								(個体数／m ²)					

※イトトンボ科s.p.は採取の際に尾鰭が損傷し、科までの同定

空欄は採取数ゼロ

(個体数/㎡)

3 ヤゴの耐乾燥・低温能力試験

a はじめに

トンボ幼虫は土の中に潜ることができる種とできない種がいたり、潜れる種でも体皮の厚さ体毛の有無などによって乾燥や寒さに対する能力が異なると考えられる。特に生物多様性の維持をする上で重要となるのは、乾燥や寒さに弱い種の耐性能力である。そこで、前述の現地調査や過去の知見から乾燥や寒さに弱いと思われるイトトンボ科アオモンイトトンボ幼虫について、耐乾燥・低温能力を精査した。

b 試験方法

野外試験では、ワグネルポット(1/5000 $\bar{\pi}$)を用いて、①常に水深を維持した湛水状態で管理(湛水管理)、②湛水していないが常に湿潤状態で管理(湿潤管理)、③湿潤状態から徐々に自然乾燥させた状態(乾燥管理)の3つの管理を行う管理区を用意した。また、ワグネルポット内の深さ30cmに砂質土、重粘土、関東ローム土をそれぞれ入れて、3つの土壤区を設定した。なお、湛水管理は砂質土のみで行った(Fig. 19, Table 4)。

試験は、各ポット内にアオモンイトトンボ幼虫を各区に12匹ずつ投入し、その後の生息状況を調査した。また、雨などが入り込まないようにアクリル製の屋根を付け、各試験区の地表温度及び土壤水分(地表から-20cm)を温度センサー及びTDR土壤水分計により30分間隔で連続計測した。なお、各ポット内のヤゴが死滅した場合は中山式硬度計による地表面の土壤硬度と炉乾燥による地表面の体積含水率の測定を行った。

室内試験では、湿潤管理と乾燥管理を行い、土壤は砂質土、重粘土、関東ローム土の3区分を設け、各区に21匹のアオモンイトトンボ幼虫を投入し、野外試験と同様の試験を行った。野外、室内の試験は共に2005年2月～3月に実施し、ヤゴの生息状況調査及び湛水管理と湿潤管理の用水供給は毎日行った。

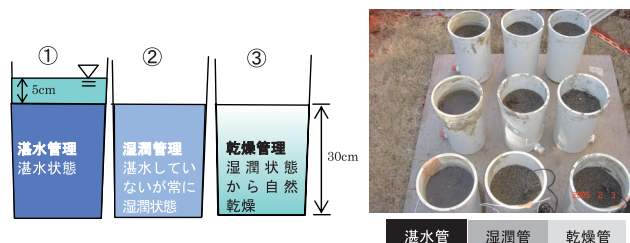


Fig. 19 ポット試験の概要
Outline of pot tests

Table 4 ポット試験の試験区分
Test categories in pot tests

試験区		湛水管理	湿潤管理	乾燥管理
野外 (各試験区に 12匹投入)	砂質土	○	○	○
	重粘土		○	○
	関東ローム土		○	○
室内 (各試験区に 21匹投入)	砂質土		○	○
	重粘土		○	○
	関東ローム土		○	○

c 試験に用いた資材

① 土壤

試験に用いた土壤は農村工学研究所内の試験水田から採取した。砂質土は砂の比率が80%以上であり、粒径が最も大きい粗砂(直径2.0～0.2mm)が約50%含まれており、土性はSL(砂壤土)である(Table 5)。また、重粘土は粒径が最も小さい粘土(直径0.002mm以下)の比率が60%以上あり、土性はHC(重埴土)である。関東ローム土はシルト(直径0.02～0.002mm)の比率が46%で一番多く含まれており、土性はSiCL(シルト質埴壤土)である。それぞれ、特徴的な土性である3つの土壤を用いて試験を行った。

また、円筒コアサンプラー(100cc)を用いて試験水田から各土壤をサンプリングし、透水係数を計測した。砂質土は 1.8×10^{-3} (cm/s)と最も低く、重粘土はほとんど

Table 5 試験用土壌の土性
Properties of soil used in tests

土壌名	国際法(相対比)			シルト(%)	粘土(%)	国際土性	透水係数(cm/s)
	粗砂	砂(%) 細砂	砂計				
砂質土	49.7	32.3	81.9	3.5	14.6	SL(砂壤土)	1.8×10^{-3}
重粘土	4.4	12.5	16.8	21.1	62.1	HC(重埴土)	3.4×10^{-6}
関東ローム土	4.6	29.4	34.0	46.6	19.4	SiCL (シルト質埴壤土)	1.5×10^{-4}

水が浸透しない 3.4×10^{-6} (cm/s) で、関東ローム土は 1.5×10^{-4} (cm/s) であった。なお、試験田からの土壌の採取は土の性質が分かりやすいように、栽培後の乾燥した状況で行っており、実際の代かきをする水田よりも透水係数が低い値となっている。

②供試体

試験対象としたアオモンイトトンボ幼虫は試験開始前に農村工学研究所内の通年湛水をしている水田(Fig. 15)から採取した個体を用いた。アオモンイトトンボ(*Ischnura senegalensis* (Rambur))は、均翅亜目イトトンボ科アオモンイトトンボ属で、腹長23～25mmでオスは腹部の第8節が鮮やかな水色の色斑がある種である(Fig. 20)。幼虫は体長15～18mmで、普段は水草などに捕まって生活している。日本の水田地帯で最もよくみられる種のひとつであり、トンボ科の幼虫とは異なり、土中に潜ることができないため、田面の乾燥化の影響を受けやすいと思われる。

d ポット内の温度推移

調査を開始した2005年2月2日から3月2日までの最低気温は最も低い日で-5.7℃、高い日でも1.5℃で、ほとんどの日で夜中から明け方にかけて零度以下の気温となっていた(Fig. 21)。

野外で湛水管理を行ったポット内の水温は約5cmの湛水深が確保されており、熱容量が大きいことから、外気が氷点下になっても零度以下になることは一度もなかった。また、野外で湿潤管理を行ったポット内の地温は湛水状態とは異なり熱容量が大きいことから、気温の低下と共に低下し、日最低地温は気温よりも2度ほど高い状況であった。乾燥管理も湿潤管理とほぼ同様に最低気温が-4℃ぐらいまで低下すると-2℃ぐらいまで日最低地温は低下した。室内で湿潤管理を行ったポット内の日最低地温は気温の低下に多少影響を受けるものの、7～9℃の範囲で推移し、野外の湛水状態と同様に零度以下になることはなかった。

e 野外試験結果

①湛水管理

野外の湛水管理区は砂質土のみの試験であったが、気温が零下になっても湛水深があるため水温は零下にならず、餌の投与なしで2ヶ月経過しても90%以上の生存率であった(Fig. 22)。湛水している場合は土壌区分による影響はほとんどないと思われることから、湛水深が維

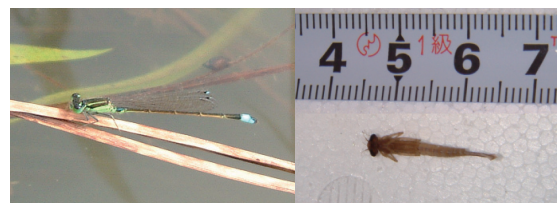


Fig. 20 アオモンイトトンボ
Ischnura senegalensis

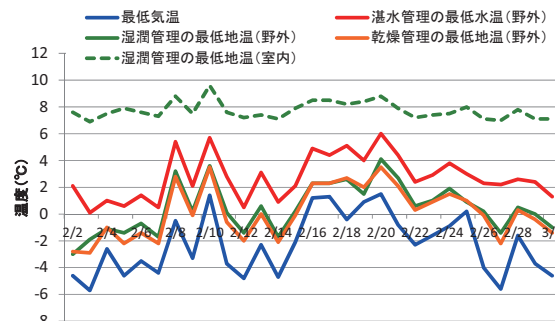


Fig. 21 ポット内の最低温度と最低気温の推移
Trends in minimum temperature in pots and minimum air temperature

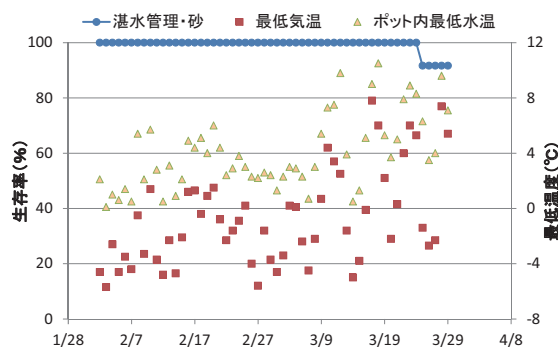


Fig. 22 湛水管理(野外)の生存率と最低気温
Survival rate and minimum air temperature in flooded management (outdoors)

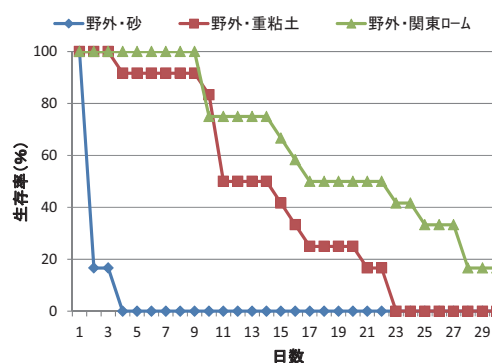


Fig. 23 湿潤管理(野外)の生存率
Survival rate in wet management (outdoors)

持されていれば乾燥・低温に弱いと思われるアオモンイトトンボ幼虫、及びその他のトンボ幼虫の生存は可能であると思われる。

②湿潤管理

野外による湿潤管理は、砂区では試験開始から1日後に80%以上の個体で死亡が確認され、3日後には死滅した(Fig. 23)。その他の土壌区では徐々に生存率が低下し、重粘土では試験開始から10日後に生存率が50%まで低下し、23日後に死滅した。関東ローム土では試験開始から20日後まで50%の生存率を維持しており、30日経過しても約20%の生存が確認された。

③乾燥管理

野外による乾燥管理は、砂質土では自然乾燥が始まってから湿潤管理と同様に生存率が低下し、試験開始から4日後に死滅した(Fig. 24)。毎日1回の水分補給がある湿潤管理とほぼ同じ生存状況であったことから、砂質土の土壌水分はアオモンイトトンボ幼虫にとって利用が困難な状態の水分であると思われる。重粘土区では、試験開始から5日で生存率が50%まで低下し、8日で死滅した。また、関東ローム土では試験開始から16日まで90%の生存率を維持していたが、その後急速に生存率が低下し、23日後に死滅した。砂質土以外の土壌は死滅までの日数が短縮しており、乾燥がアオモンイトトンボ幼虫の生存を妨げる要因であることが分かった。

なお、ポット試験における重粘土区の土壌は、現地調査の圃場(Fig. 14, 17)から採取したものであり、実際に2002年10月30日の落水後から11月1日に9mmの降雨があったが、その後11月25日の16mmの降雨まで水の補給はなく、11月15日以降の調査からアオモンイトトンボをはじめ、ショウジョウトンボ、ギンヤンマなどのシオカラトンボ以外の幼虫も採取されなくなった。

f 室内試験結果

①湿潤管理

室内による湿潤管理では全土壌区で1ヶ月経過しても50%以上の高い生存率を維持した(Fig. 25)。野外試験ではポット内の最低地温がたびたび-2℃まで低下したが、室内試験では7℃以下に低下しなかったため、同じ水管理を行っても生存率が高かったと思われる。

②乾燥管理

室内による乾燥管理は低温というマイナス要因はないが、砂質土では8日後、重粘土では11日後、関東ローム土では19日後に死滅した(Fig. 26)。乾燥と低温のマイナス要因がある野外による乾燥管理とほとんど同じ結果であったことから低温よりも乾燥のマイナス要因の方が大きいことが分かった。

g 死滅時の土壌水分及び土壌硬度

野外による乾燥管理は、自然乾燥が始まってから砂区で4日、重粘土区で8日、関東ローム区で23日後に死滅し、その時の体積含水率はそれぞれ15.6%、53.7%、61.9%であった(Table 6)。また、室内試験では砂区で8日、

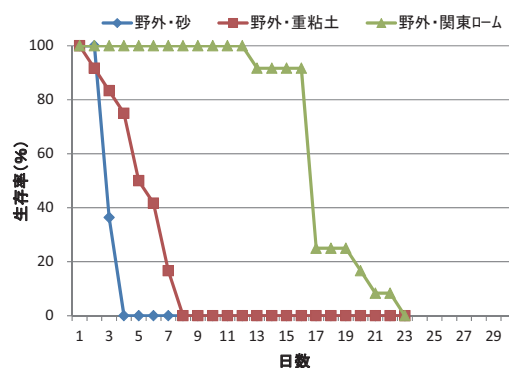


Fig. 24 乾燥管理（野外）の生存率
Survival rate in dry management (outdoors)

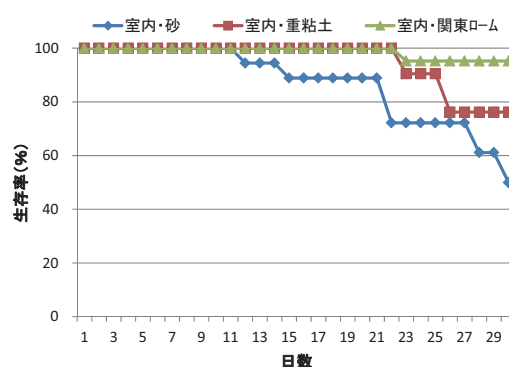


Fig. 25 湿潤管理（室内）の生存率
Survival rate in wet management (indoors)

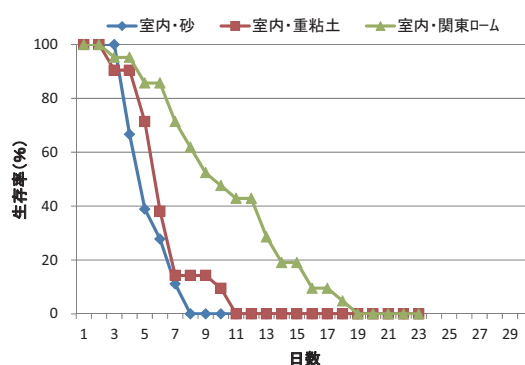


Fig. 26 乾燥管理（室内）の生存率
Survival rate in dry management (indoors)

Table 6 死滅時の土壌水分及び土壌硬度
Soil moisture and soil hardness at point of death

	野 外			室 内		
	砂質土	重粘土	関東ローム	砂質土	重粘土	関東ローム
体積含水率 (%)	15.6	53.7	61.9	14.7	56.6	67.2
土壌硬度 (N/mm ²)	0.02	0.04	0.41	0.14	0.38	0.37

試験開始時の土壌硬度は全て0.02N/mm²以下

重粘土区で11日、関東ローム区で19日後に死滅し、体積含水率はそれぞれ14.7%、56.6%、67.2%で生存日数が長かったにもかかわらず、生存日数が長い土壤ほど高い土壤水分であった。土の保水力は粒径と母材によって大きく変わる。また、毛管作用による水供給力によっても変わるため、砂のように粒径が大きく保水力と水供給力が低い土壤では死滅までの期間が短い。また、保水力が高いが透水性が悪いため水供給力が低い重粘土は、保水力と水供給力が共に高い関東ローム土よりも早く死滅したと考えられる。

また、死滅時の土壤硬度は野外試験の関東ローム区と室内試験の重粘土区、関東ローム区でコンバインの走行に必要とされる 0.29N/mm^2 以上であった(Table 1, 5)。砂質土の場合、機械走行を可能とする土壤硬度に到達する前にアオモンイトトンボ幼虫が死滅してしまうが、保水力のある関東ローム等では必要とされる土壤硬度を得たときも生息可能であったことから、過剰な乾燥を避ければ一般的な栽培管理とトンボ保全の両立が可能であることが示唆された。

4 まとめ

a 圃場整備によるトンボへの影響

水稻収穫後の非灌漑期に実施される圃場整備は表土扱い工法によって、幼虫や卵が生息する表土を乾燥した状態で数ヶ月間、放置される。非灌漑期に表土に生息する生活環タイプ(Fig. 9)はWT種以外のSP種、SM種、AT種、DV種であり、これらの種に対して保全対策が施されないと生息が困難となり、整備時のHU(ハビタット・ユニット)をゼロ、もしくは大幅に落とすこととなる。なお、WT種はわずか3種(オツネトンボ、ホソミオツネトンボ、ホソミイトトンボ)しか生息しておらず、新井(2001)によるとこれらの種は10月下旬ごろに杉林などに飛来し、3月下旬ごろまで比較的日当たりの良い林床部に生息すると報告があることから、圃場整備による直接的な被害はないと思われる。

b 田面の乾燥化がトンボ幼虫に与える影響

①非灌漑期

イトトンボ科やギンヤンマなど水田地帯の代表的なトンボ種の多くは非灌漑期に落水すると生存が確認出来なくなった。中でもアオモンイトトンボ幼虫は湛水深がなくなってから砂質土で4日、重粘土で8日、関東ロームで23日の間に降雨もしくは何らかの用水供給がないと生息が困難になることが分かった(Table 7)。また、湛水深がなくても湿潤状態であれば生息可能であるが、冬の寒さは生存率を低下させることが分かった。

②灌漑期

水稻栽培水田は一般的には中干しを行い、また収穫前にはコンバイン収穫を可能とさせるため、圃場を乾かし、地耐力(土壤硬度)を向上させる。室内実験の結果から、灌漑期においても中干しなどによる田面の乾燥によっ

Table 7 アオモンイトトンボの田面の乾燥化から死滅までの日数
Days from drying of paddy surface to death of *Ischnura senegalensis*

	砂質土	重粘土	関東ローム土
野外実験 (非灌漑期)	4日	8日	23日
室内実験 (灌漑期)	8日	11日	19日

て、砂質土で8日、重粘土で11日、関東ロームで19日で生息が困難になる(Table 7)。また、非灌漑期とは異なり零下になることはないため、湿潤状態であれば生息は可能である。

今回は降雨の影響のないように屋根のある状態でポット試験を行ったが、実際の水田では降雨による水の供給があり、足跡やトラクターの轍によるスポット的な深みもあることから乾田化によってトンボ幼虫が絶滅するとは言い切れないが、圃場整備によって暗渠排水整備がされると必然的に地下水位が低下し、田面の滞水もなくなることから、結果的に圃場整備後の水田内のHUは減少すると推測される。

Ⅲ トンボの移動距離の測定

1 トンボの移動距離について

a 圃場整備による表土扱いの影響

圃場整備事業は多くの場合、農閑期である冬場に工事が行われ、区画整備のための表土扱いによって、多くの生物が生息している表土を乾燥した状態で一時的に保管する。また、これまでの調査結果から、圃場整備によって促進される圃場面の乾燥化はトンボ幼虫の生息を著しく困難にさせることが分かった。そのため、ミティゲーションを行う際、圃場整備によって破壊された生息地に種を復元させることが不可欠となる。また、整備後の水田における生物多様性の維持には、生息地間で個体の移動ができることが重要となる。

そこで、圃場整備の際に止水域性トンボの保全地を設ける場合などを想定し、適切な設置間隔の判断材料を得るため、トンボの一生の行動範囲を標識再捕獲法によって調査した。特に本研究では水田地帯に生息する多様なトンボ種を保全することを目的としていることから、移動能力の低い種を対象とした。

b 保全に必要な個体群(メタ個体群)

鷲谷ら(1997)やLik Saccheriら(1999)によると、種の供給や生息地が限定されてしまった閉鎖的な個体群内で起こる遺伝的変異は、将来その個体群を絶滅へ導く要因となるという。そこで、ある種の個体群を保全するには個体群間での遺伝子の交流などによって相互に関係し、遺伝的変異を高める必要があり、その集団をメタ個体群と呼ぶ。

メタ個体群とは、局所個体群間で個体の交流は限られているが相互に作用し合っている個体群全体をメタ個体

群という。メタ個体群の条件として、以下のことがあげられる。①生息地パッチには局所個体群が繁殖していること。②一つの大きな個体群では個体群の長期間の存続が難しいこと。③それぞれのパッチは孤立し過ぎておらず、消滅しても他の局所個体群からの移入で再生される可能性があること。④それぞれの局所個体群の個体数変動は同調しておらず、すべての局所個体群が同時に消滅する可能性がほとんどないこと。

これらのことから、圃場整備に際して、あるいは既に生物多様性が低下してしまった地域においても、種の供給が確保される間隔で生物保全地を配置することができれば、生物多様性を回復・維持できると考えられる。その際の最も重要となる数値は生物の移動距離となる。

2 標識再捕獲法によるトンボの移動距離測定

a 調査地区の概要

栃木県宇都宮市平出町に位置する調査地区は、宇都宮市の市街地から5kmほど離れた、鬼怒川中流部の沖積平野に広がる水田地帯である(Fig. 27)。ここには社団法人農村環境整備センターが主催する「田んぼの学校」活動の一環でつくられた「メダカの学校」があり、メダカの保全・繁殖場所として、休耕田(約600m²)には通年湛水を行っている。このことにより、休耕田にはヤゴやタガメ、ゲンゴロウなどの水生昆虫も多数生息している。調査はこの通年湛水休耕田を中心とする半径約2km内を対象とした。一帯は圃場整備済であり、非灌漑期には湛水しない、いわゆる“慣行農法”地区であり、現在の我が国の一般的な平地水田地帯とみなされる。なお、2000年8月の踏査による調査対象地区の水環境状態は、Fig. 27に示すとおりであった。

b 調査方法

調査対象生物はトンボ目・イトトンボ科・アジイトトンボ種(*Ischnura asiatica*)とした(Fig. 28)。この種は、本州の水田地帯で非常によくみられる種で、出現期間は4月から10月と長く、春に出現した個体が産卵し、その次の世代が繁殖する8月が最盛期となる。また体長は4cm程度で、他種のトンボや飛翔して移動する昆虫類と比べて移動能力が比較的低い点で、生物保全地間に必要な最小間隔の把握に適していると判断した。移動距離の測定は標識再捕獲法(mark-and-recapture method)によった。これは、捕獲した個体群の体の一部にマークを付けて放ち、その後に再捕獲された個体群中のマーク個体から、移動距離を把握する方法である。本研究では、個体の一生の移動距離を把握する必要から何度も捕獲し、それに伴う飛翔能力への悪影響を避けるため、全て目視によることとした。なお、アジイトトンボと類似する同科のトンボ種は、調査地区内には生息していないことをあらかじめ確認している。

c 捕獲(マーキング)作業

通年湛水休耕田で羽化直後の個体以外のアジイトト

ンボを捕獲し、個体にポスターカラーで印をつけて放す(マーキングは、影響を最小限にとどめるために、飛翔の駆動部ではない羽の付け根と尻尾の2ヶ所を選択した(Fig. 29)。また、ポスターカラーは雨に濡れても消えないものを使用した)。調査日ごとのマークキング個体数を記録し、またマークは調査日ごとに異なる色を用いて、マーキング日が分かるようにした。作業は毎回6人で行い、捕獲作業時間は午前10時から12時までの2時間とした。期間は2000年8月21日～27日の連続した7日間であった。

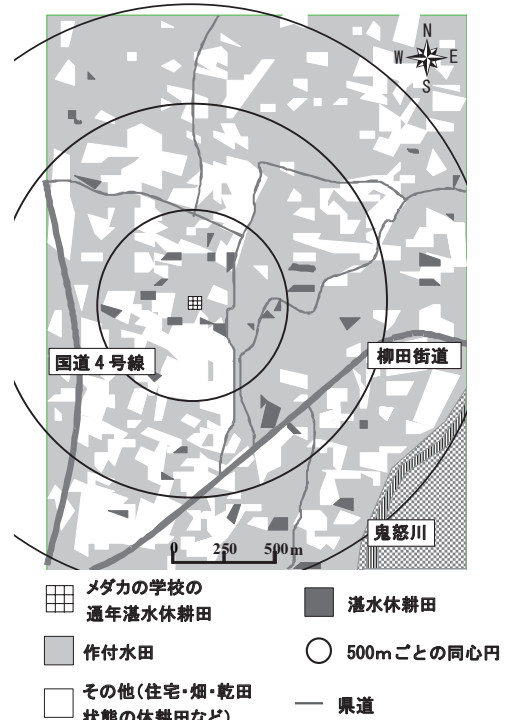


Fig. 27 調査地区の水環境状態(2000.8)
State of water circulation in the survey area (Aug. 2000)



Fig. 28 アジイトトンボ(マーキング個体)
Ischnura asiatica (marked individual)



Fig. 29 捕獲作業状況
State of capture work

なお、体長の小さなアジイトトンボを調査対象生物に選んだことから、マーキングのペイント重量が飛翔の阻害要因になることが懸念された。マーキング前後の個体重量は平均してマーキング前重量の約2%増に納まっている (Table 8)。

Table 8 マーキングによる体重量の増加
Increase in body weight by marking

マーク前後の 個体重量(mg)		増加比 (%)
前	後	
14.2	14.5	2.1
15.0	15.4	2.7
14.3	14.5	1.4
13.3	13.4	0.8
13.0	13.4	3.1
19.1	19.5	2.1
18.0	18.1	0.6
16.0	16.5	3.1
17.1	17.8	4.1
21.6	22.4	3.7
17.1	17.2	0.6
15.8	15.9	0.6
平均	16.2	16.6
		2.1

d 事後の再目視調査

通年湛水休耕田を中心とする半径約2km内の地区を調査地とした。そして、水環境状態踏査の結果を参考に、より多くの個体を再目視するのに適していると思われる、水田や湛水休耕田など、水の張ってある圃場を通る再目視ルートを調査地内に設定した。また、調査地区の西側にある国道4号線 (Fig. 27) は宇都宮市の主要道路で昼夜を問わず交通量があることから、国道4号線以西への移動は不可能であると考えられたため、再目視ルートとして設定しなかった。再目視ルート上で、稲などの茎に止まっている個体や、死角になっている場所に止まっている個体を追い出すために捕虫網を左右に振りながら歩き、アジイトトンボを再目視した。目視した個体は、マークの有無に関係なく全て地図上に記録した。また、マークのあった再目視個体はそのマーク色も併せて記録した。再目視調査はマーキング初日から、最後のマーク個体も死滅すると考えられる、最終マーク日から2週間後まで約3週間に14回行った (2000年8月21日～27日、30日、9月1、2、4、6、7、13日)。

また、再目視調査開始から4日目以降は、出現した全ての個体について、生育度合いを成体、未成体、未成熟に3分類して記録した。生育度は体色の違いから判断した。羽化直後は体が湿っていて体色は白色 (未成熟) に近いが、成長するにつれて背筋に黒い線が入ったオレンジ色 (未成体) になり、その後は黄緑色 (成体) に変化する。また、トンボの繁殖行動 (ペアリング) は2個体が連結して飛翔するため目で判断できることから、繁殖行動中の個体は他の個体と区別して記録した。

3 アジイトトンボの移動距離

a 捕獲 (マーキング) 作業の結果

マーキングは、8月21日 (640個体)、22日 (652個体)、23日 (458個体)、24日 (448個体)、25日 (409個体)、26日 (441個体)、27日 (404個体) と、7日間で合計3,043個体に達した。

b 再目視調査の結果

①再目視調査の気象条件

再目視調査時の気象状態は Table 9 に示すとおりであった。前半7日間はマーキング作業の後に再目視調査を行ったことから、調査時間は13時～15時半ではほぼ一定であるが後半の7日間は一定ではない。天候は晴れもしくは曇であった。また、調査期間中の気温は30℃を超える日が多かったが、南向きの風が吹いた9月4日、13日はともに気温がやや低下した。風の強さは体感データであり、参考として記載しているが強風日はなかった。

②目視個体数と再目視個体数および生育度

全ての目視個体数のうち、マーキングした個体の再目視個体数は Table 10 に示すとおりである。また、調査日によって調査ルートの距離が異なるため、調査日ごとの目視個体を踏査距離で除して目視密度として算出した。14日間にのべ264.6kmの踏査において7,553個体を目視し、48個体が再目視個体であった。マーキングは3,043個体に行ったことから、再目視率は1.6% (48 / 3,043) であった。目視密度は調査日によって大きく異なるが、気温や天候との間には明確な関係はなかった。

また、8月24日から行った生育度の分類と繁殖行動

Table 9 再目視調査時の気象状態
Weather conditions in re-sighting survey

	8月21日	22日	23日	24日	25日	26日	27日
調査時間 (開始～終了)	13:13～15:35	13:00～15:20	13:00～15:32	13:01～15:32	13:10～15:40	13:10～16:15	13:08～16:00
風向き	北	北	無風	北	北	北	北
風の強さ (体感)	弱	弱	-	微	弱	弱	弱
開始時気温 (°C)	30.9 (晴)	31.4 (晴)	34.6 (晴)	30.8 (晴)	32.2 (晴)	30.8 (晴)	33.9 (晴)
終了時気温 (°C)	30.8 (曇)	32.4 (晴)	31.3 (曇)	30.8 (曇)	31.8 (晴)	30.9 (曇)	30.3 (曇)
	30日	9月1日	2日	4日	6日	7日	13日
調査時間 (開始～終了)	10:15～14:55	13:00～15:20	12:40～14:00	13:25～14:50	10:10～12:25	10:30～12:00	12:55～15:05
風向き	北	北	無風	南	北	北	南
風の強さ (体感)	弱	弱	-	弱	弱	弱	微
開始時気温 (°C)	27.6 (曇)	26.6 (曇)	36.4 (晴)	25.9 (曇)	25.1 (曇)	27.4 (曇)	28.7 (曇)
終了時気温 (°C)	32.3 (晴)	27.1 (曇)	36.4 (晴)	25.6 (曇)	26.1 (曇)	27.0 (小雨)	27.7 (曇)

Table 10 再目視調査結果
Results of re-sighting survey

	8月21日	22日	23日	24日	25日	26日	27日	30日
目視個体数	509	801	468	611	459	535	383	871
再目視個体数	0	1	3	8	6	11	8	6
踏査距離(km)	23.8	23.8	23.8	22.1	21.4	21.4	21.4	21.4
目視密度 (個体数/km)	21.4	33.6	19.7	27.7	21.5	25.0	17.9	40.8
調査人数	6	6	6	5	5	5	5	5
成体	—	—	—	535	395	405	299	709
未成体	—	—	—	51	42	97	56	77
未成熟	—	—	—	25	22	33	28	85
ペアリング数	—	—	—	10	20	12	12	324
ペアリング率(%)	—	—	—	1.9	5.1	3.0	4.0	45.7

	9月1日	2日	4日	6日	7日	13日	合計
目視個体数	168	433	405	1184	245	481	7553
再目視個体数	1	1	0	1	1	1	48
踏査距離(km)	7.0	10.7	15.0	24.3	8.0	20.7	264.6
目視密度 (個体数/km)	24.1	40.4	27.0	48.7	30.5	23.2	28.5
調査人数	3	2	3	6	2	5	
成体	156	405	360	910	218	369	4761
未成体	12	16	38	191	23	12	615
未成熟	0	12	7	83	4	27	326
ペアリング数	14	22	168	238	94	100	1014
ペアリング率(%)	9.0	5.4	46.7	26.2	43.1	27.1	21.3

—: 未調査

中(ペアリング)個体数を **Table 10** に示した。ペアリング率は繁殖行動中の個体数を、目視した成体の数で除して算出した。成体、未成体、未成熟の判別開始以降に目視した個体の 83.5% (4,761 / 5,702) が成体で、うち 21.3% (1,014 / 4,761) がペアリング状態であった。

③再目視個体の発見地点

再目視した 48 個体の発見地点を **Fig. 30** に示した。再目視した個体はマーキングを行った通年湛水休耕田の近辺で多数発見され、200～300m 程離れた休耕田で数個体、1000m 以上離れた場所で 1 個体が発見された。また、

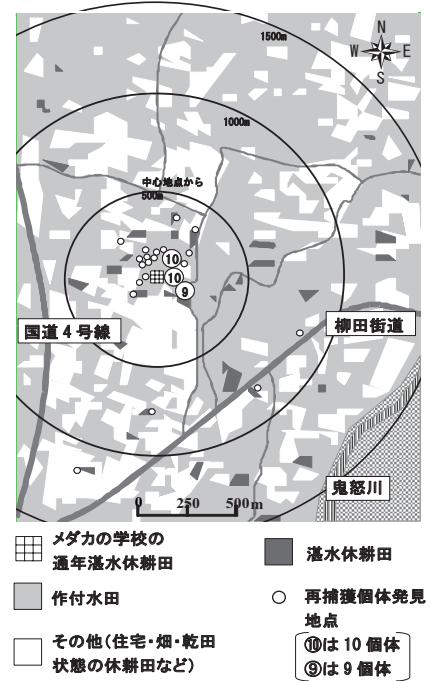


Fig. 30 再目視個体の発見地点
Discovery sites of re-sighted individuals

1 個体が道幅 10m 以上ある柳田街道を越えていた。石田ら(1988)によると、トンボの静止行動には、草や細い木の枝などにつかまって静止する懸垂型と、地面や石の上になどに覆い被さるように静止する密着型の 2 タイプがあり、アジアイトトンボは懸垂型である。道路にはつかまって静止する場所がないことから、1 回の飛翔でこの道路を越えたものと判断され、1 回の飛翔距離が 10m 以上に達することもあることが分かった。また、ほとんどの調査日で北向きの風が吹いていたが、再目視個体は北側に偏っていないことから、微風による飛翔方向への影

$$\text{ゾーン別目視頻度} = \frac{\text{ゾーン別目視個体数(個)}}{\text{ゾーン別ルート距離(km)}} \quad (1)$$

$$\text{ゾーン別再目視頻度} = \frac{\text{ゾーン別再目視個体数(個)}}{\text{ゾーン別ルート距離(km)}} \quad (2)$$

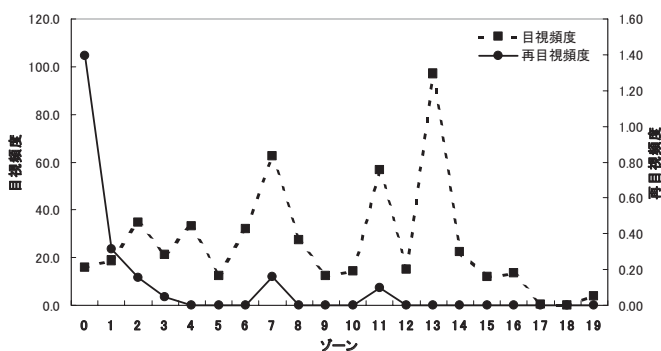


Fig. 31 目視頻度と再目視頻度の関係
Relationship between frequency of sighting and re-sighting

Table 11 ゾーン別の再目視調査結果
Results of re-sighting survey by zone

ゾーン	中心からの距離	目視個体数	再目視 個体数	ルート距離 (km)
0	0～100m	343	30	21.5
1	100～200	422	7	22.31
2	200～300	1345	6	38.94
3	300～400	453	1	21.48
4	400～500	607	0	18.34
5	500～600	253	0	20.56
6	600～700	1005	0	31.51
7	700～800	1175	3	18.79
8	800～900	244	0	8.90
9	900～1000	94	0	7.73
10	1000～1100	131	0	9.27
11	1100～1200	596	1	10.48
12	1200～1300	131	0	8.79
13	1300～1400	515	0	5.29
14	1400～1500	140	0	6.26
15	1500～1600	50	0	4.14
16	1600～1700	32	0	2.35
17	1700～1800	1	0	2.90
18	1800～1900	0	0	1.00
19	1900～2000	16	0	4.03
合計		7553	48	264.6

響はあまりないと判断された。

④ゾーン別出現率および再出現率

マーキング個体を放った通年湛水休耕田からの移動距離を求めるため、通年湛水休耕田を中心とする100 mごとのドーナツ状の同心円ゾーンに分けた。目視した全7,553個体と、そのうちの再目視個体である48個体の目視場所をゾーン別に整理した(Table 11)。また、各ゾーンにおける調査回数や各ゾーン内のルート距離には差があるため、各ゾーン内における踏査距離をゾーン別ルート距離とした。目視個体数はゾーンによって大きく異なっているが、ルート距離も異なっているため、式(1)、式(2)によりゾーン別目視頻度とゾーン別再目視頻度を求めた(Fig. 31)。

ゾーン別目視密度はゾーンによって大きく異なり、特にゾーン7, 11, 13では大きな値となった(Fig. 31)。これは、ゾーンごとにトンボの生息環境条件がかなり異なっていることを示唆している。ゾーン別再目視頻度はゾーン0が一番高く、中心から離れるに従い低くなる傾向にあり、ゾーン4で一旦0となるがゾーン7と11で再目視された。ゾーン7, ゾーン11ではゾーン2の値に近くなっている。

4 トンボの移動距離とビオトープ設置間隔

a アジアイトトンボの出現場所および行動

目視個体数とペアリング個体数を湛水休耕田で目視されたものと、その他の水田や畑などで目視されたものとに分けて整理した(Table 12)。面積率の小さい湛水休耕田における目視率は86%であり、湛水休耕田にアジアイトトンボが集中して出現しているといえる。また、各ゾーン内の湛水休耕田面積とゾーン別の目視個体数の関係はFig. 32のとおりで、正の相関関係($r = 0.68, p \leq 0.05$)がみられた。

また、ペアリング個体も目視個体と同様に湛水休耕田で94%の個体が繁殖行動をとっており、湛水休耕田は出現場所のみならず、繁殖場所としても利用されている。上田(1985)は、イトトンボ科クロイトトンボの繁殖個体群の空間分布について詳細に調査しており、雄は良好な繁殖場所またはその周辺部で雌の飛来を待ち構え交尾・産卵をするとの報告がある。同じ科であるアジアイトトンボについても同様の傾向となっており、湛水休耕田が良好な繁殖場所、雌雄が出会いを求めて移動してくる場所となっていることが示唆された。なお、本調査地区の非灌漑期は、通年湛水休耕田以外の水田では全て乾燥状態になっているが、多くの個体の繁殖行動が認められた。これらの個体は通年湛水休耕田に生息しているトンボが飛来してきたものと考えられ、移動可能な距離に保全地を設けることによって、種の供給が可能になることを示唆している。

b アジアイトトンボの移動距離

目視頻度が高かったゾーン7とゾーン11では再目視

Table 12 水環境状態とトンボの出現率

Water environment status and dragonfly appearance rate

	目視 個体数	率(%)	ペアリング 個体数	率(%)	面積 (km ²)	率(%)
湛水休耕田	6514	86.2	954	94.1	0.06	0.5
その他	1039	13.8	60	5.9	12.50	99.5

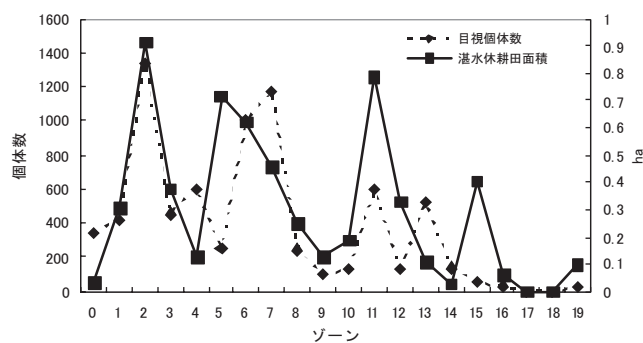


Fig. 32 目視個体数と湛水休耕田面積の関係

Relationship between number of sighted individuals and flooded fallow field area

頻度も高くなっていた。しかし、目視頻度が最も大きいゾーン13では多くの個体が生息しているが、再目視頻度はゼロであり、良好な繁殖地である湛水休耕田が多くありゾーン15も同様に再目視はゼロであった。このことから、ゾーン13以上はアジアイトトンボの移動可能距離を超えてしまうため、ゾーン内に良好な生息地が存在するものの、マーク個体が飛来できなかったことを示している。これによりアジアイトトンボの移動可能距離は1100～1200 mであると判断できる。

また、繁殖を目的とする移動は良好な繁殖地がない場合、それを求めて長距離を移動する可能性があるため、日常的な行動範囲とは異なる。ゾーン0からゾーン3までは指数的に一定の割合で減少しており、ゾーン4で再目視頻度はゼロになっていた。そのため、アジアイトトンボの日常的な行動範囲は400m以内であることが推測された。

c 保全地の設置間隔について

本研究結果から、アジアイトトンボは、①湛水休耕田に集中して出現し、繁殖行動も行っている。②移動可能距離は1.1～1.2kmである。③日常的な行動範囲は400m以内であることが明らかになった。

ここでは、飛翔して移動するアジアイトトンボの移動距離を調査したが、他のトンボ種や這って移動する両生・爬虫類のような、移動手段の異なる生物も含めて、同様の知見を集積することによって、生物多様性を高める生物保全地の妥当な間隔が明らかになると考えられる。また、その際に標識再捕獲法は、個体の移動を確実に判断することができる調査方法ではあるが、大変労力のかかる調査でもあることから、今後標識再捕獲法に代わる新たな移動距離調査方法の開発が必要と考える。

5 シミュレーションによるトンボ移動距離の推定

a はじめに

生物の移動距離や移動経路などを調べる方法としてポイントでマーキングした個体を定点で多数放って、後日広い範囲で捕獲して到達距離を確かめる標識再捕獲法がひろく用いられてきた。しかし、マーキングエリアから離れるほど、再捕獲数が減少する傾向にあることを明らかとなった(Fig. 31)。イトトンボのような小動物の場合において、本調査方法は大変な労力がかかるばかりでなく、完全には再捕獲できないことから、確実に成果を上げるためには、別途手法が必要である。そこで、コンピュータシミュレーションを用いて、飛翔して移動する昆虫の移動距離を推定する方法の開発を試みた。

b 研究の方法

シミュレーションは、モンテカルロ法プログラムを作成して行った(Fig. 33)。アジイトトンボの1日の飛翔回数と1日の個体増加数を入力し、1個体の飛翔方向と1回飛翔距離は確率的ランダムウォークに従うものとして、1日飛翔後の位置が、出発点を原点(0, 0)とする座標点で出力される。これを1日の投入個体数分繰り返す、さらにこれを1日きざみでアジイトトンボの生存可能日数分繰り返すことによって、個体の一生の到達点をカバーする、定常生存状況がメッシュ図の形で得られる。したがって、このメッシュ図は再捕獲調査の結果と直接に比較可能なものとなる。

c 各パラメーターの設定

① 飛翔方向

360度全方向(omni direction)とし、各方向に向かう確率は一様乱数を用いて均等とした。

② 1回飛翔距離モデル

野外観察の経験をもとに1回の飛翔距離は2～3mで飛翔距離頻度(Fig. 34)が最大となるF分布乱数関数を用いてプログラムに組み込んだ。

③ 生存日数

上田(1987)による、クロイトトンボについての報告で

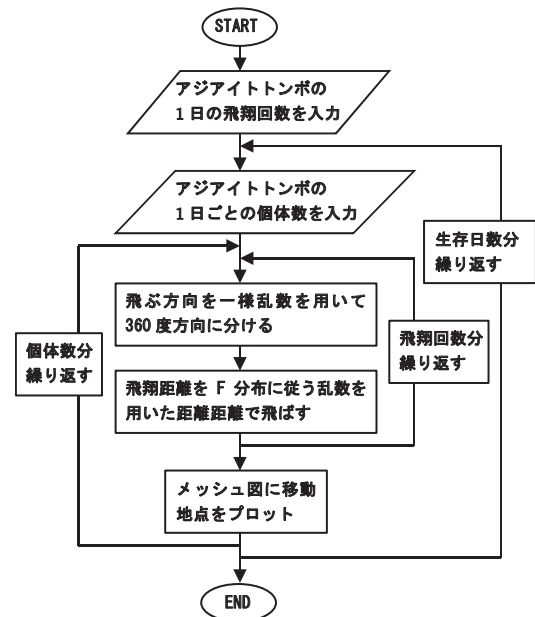


Fig. 33 シミュレーションのフロー
Flow of simulation

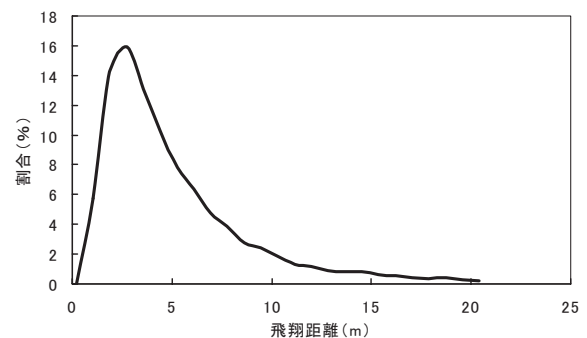


Fig. 34 1回の飛翔距離の確率分布
Probability distribution of a single flight distance

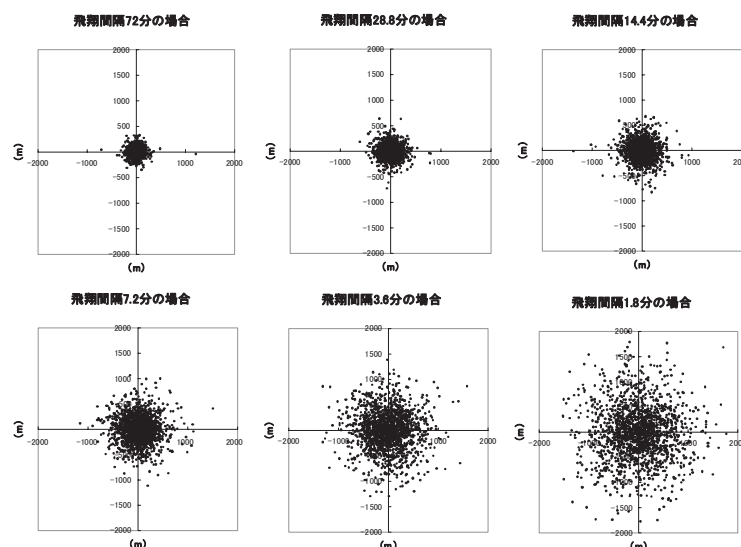


Fig. 35 シミュレーションによる定常生存状況
Constant survival status by simulation

は、雄と雌の羽化後の平均生存日数はそれぞれ 15.7 日と 18.68 日で、羽化時の性比はほぼ 1:1 であることから、その雄と雌のほぼ中間の 17 日を参考に、アジアイトトンボの平均生存日数を 17 日と推定した。

④ 1 日の活動時間

上田(1976)によれば、クロイトトンボの 1 日の生活行動が始まるのは早い個体では 6 時前後で、19 時頃にはほとんどの個体が水域から姿を消す。これを参考に、本シミュレーションではアジアイトトンボの活動時間を 6 時頃～18 時頃までの 12 時間と設定した。

d シミュレーション結果と考察

個体の 1 日の飛翔回数の観察報告は存在していないため、10 回、25 回、50 回、100 回、200 回、400 回の 6 通りで試行した。1 日の活動時間を 12 時間としていることから、飛翔間隔(止まっている時間)はそれぞれ 72 分、28.8 分、14.4 分、7.2 分、3.6 分、1.8 分となる。ただし飛翔時間は数秒間にすぎないので無視した。

シミュレーションの結果、生存個体位置、すなわち定常生存状況図を各ケースについて得た(Fig. 35)。ケースごとに、原点からの距離 100 m ごとのゾーンにいる個体数を、ゾーン面積で除して各ゾーンの個体密度を求めたうえで、0～100m ゾーン(ゾーン 0)の個体密度で除して正規化した(Fig. 36)。また、標識再捕獲調査の結果を同様に正規化した値も併せて示した。両者を比較すると、標識再捕獲調査の結果はゾーン 6 までは規則的に減少しており、シミュレーションの結果も中心から離れるに従って減少する同様の規則性を示している。そして飛翔間隔 28.8 分の場合に標識再捕獲調査の結果とほぼ一致することがわかった。この場合の飛翔間隔 28.8 分は野外観察結果と矛盾しない値である。しかし、再捕獲調査における最遠捕獲ゾーン 1100～1200 m (ゾーン 11) の、シミュレーションによるゾーン個体密度は 0.03 匹/ha と非常に低い。シミュレーションはホモジュニアな地域を前提としているが、実際の現場にはビオトープや水張り休耕田など各々の種にとって良好な生息地が不均等に点在していて、一部のトンボがこれらを選択的にたどって迅速に遠くまで移動することから、シミュレーションシステムに空間特性の組み込みが必要となる。

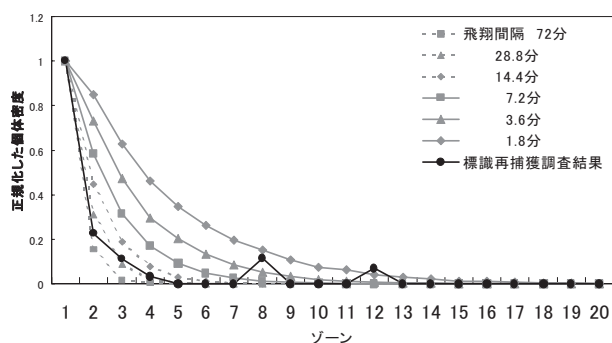


Fig. 36 シミュレーション結果と再捕獲調査結果の比較
Comparison of simulation results and recapture survey results

e シミュレーションの可能性について

標識再捕獲調査の結果とほぼ一致するシミュレーション結果を得ることができたことは、個体の飛翔間隔と 1 回飛翔距離のデータがあれば、シミュレーションによるトンボの移動距離の推定が可能であることを示唆している。しかし、今回用いた 1 回飛翔距離は推定値であるため、今後観察調査によって正確なデータを把握する必要がある。また、実際の調査地は生息条件が場所によって大きく異なっているため、空間特性のシミュレーションシステムへの組み込み方についても今後検討する必要がある。シミュレーション方法が高精度に完成された暁には、飛翔間隔や 1 回飛翔距離等の生物の能力や習性についての観察データが揃うことで、労多く精度の悪い再捕獲法に依らずに済むことが期待される。

6 まとめ

a 圃場整備による止水域のネットワーク分断

圃場整備を実施する際、移動能力の低いアジアイトトンボの移動距離である 1.1～1.2km 以内の間隔で生息地を確保しないと、イトトンボ科の種や移動能力の低い種における事業サイト内の止水域のネットワークは分断されることが分かった。そのため、圃場整備時の止水域性トンボの保全地は、周囲に障害物などが無い理想的な立地の場合、約 400ha に 1 カ所の割合で確保することで整備時にネットワークを分断することなく、HU(ハビタット・ユニット)の低下を抑えることができる。なお、圃場整備事業の採択基準は経営体育成基盤整備事業では 20ha 以上となっており、中山間地域総合整備事業については県営では 60ha 以上、団体営では 20ha 以上となっている。保全地の設置は配置場所や地形条件によって変化するが、1 ないし 2 カ所設置することで、事業サイト内のネットワークの分断を防ぐことが可能である。しかし、圃場整備時の保全地の確保は困難な場合が多い。その場合は、全面的な整備をするのではなく、2 ヶ年以上かけた整備を段階的に行うことで、整備による影響を緩和できる可能性がある。

b 整備後の止水域のネットワーク化

圃場整備時に保全地の確保ができない場合は、生活環タイプでは WT 種を除く全てのタイプのトンボ種の生息地が一時的に破壊されてしまう。そのため、事業後の HU の回復には他の地域(事業サイトの外)から種の供給が不可欠となる。そのため、事業サイト外に対象となるトンボ種の供給源が移動可能な距離(アジアイトトンボでは 1.1～1.2km)にあるか確認する事前調査が必要となる。

また、アジアイトトンボの移動距離である 1.1～1.2km は生息地のネットワークを分断しないための最低の距離である。そのため、圃場整備後の事業サイト内の HU の向上には、より確実に活発なネットワーク化を図る必要があり、それには行動範囲である 400m 以内に繁殖可能

な保全地を設けることが重要である。

Ⅳ 水田の管理方法がトンボ保全に与える影響

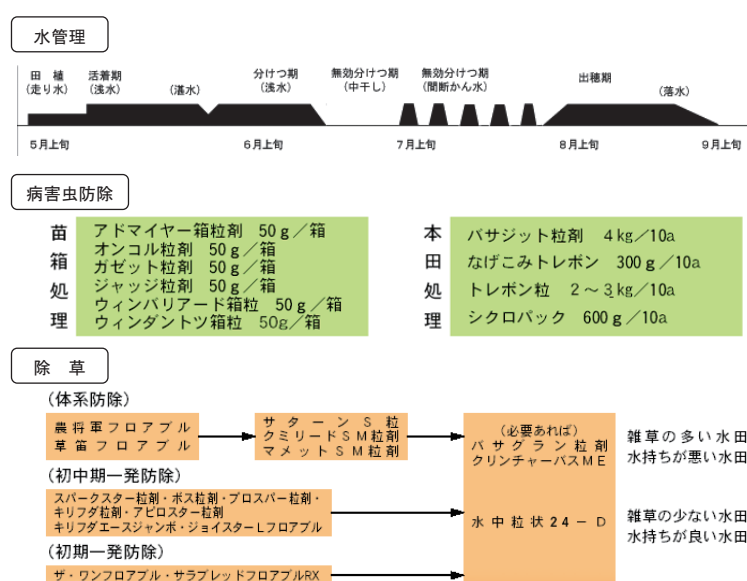
1 水田の管理方法が生物多様性に与える影響

a はじめに

圃場整備後の水田環境は整備前と比べ、排水路整備による地下水位の低下や暗渠排水整備によって、湿地環境が減少し、水田も乾燥化される。これまでに、田面の乾燥化によるヤゴの生息への影響を明らかにしてきたが、ミティゲーションの際、ネット・ロスをした場合は、その分のネット・ゲインをして、最終的にノー・ネット・ロスを目指す必要がある。そのためには、従来から行われてきた水田の利用方法よりも生物に配慮した水田管理や営農技術が必要とされる。特に、圃場整備後のHU(ハビタット・ユニット)の回復に期待されるビオトープは、用地確保の問題から限られた面積でより多くの生物を保全する必要があるため、効率的な管理方法の確立が不可欠である。そこで、トンボの生息環境として良好な水田の管理方法を明らかにすることによって、ノー・ネット・ロスを実現するミティゲーション手法を検討する。

b 一般的な水田の管理方法

水稻栽培水田における一般的な管理方法は、まず4月に元肥を散布した後に耕起を行い、荒代を行う。4月の下旬から5月の月上旬に代かきを行い、田植えをする(Fig. 37)。その後、稲の活着期を経て6月下旬から7月上旬まで中干しを行う。中干し後は間断灌漑を行い、出穂期、登熟期を経て収穫前の9月上旬に落水を行う。その後は水田に水を入れることはなく、降雨による水たまりが残る程度である。



JA 茨城中央 HP : <http://www.ja-ibaraki-kuou.jp/eino-1.htm>

Fig. 37 茨城県の水田の一般的な管理方法

Usual paddy field management in Ibaraki Prefecture

イネミズゾウムシやドロオイムシといった苗の新葉や根を食べる害虫の防除は、苗箱処理が一般的で田植え時にアドマイヤー箱粒剤などを散布する。また、田植え後もイモチ病防除にコラトップ粒剤やキタジンP粒剤、ブラシンなどの薬剤を散布する。また、除草剤の散布は雑草の量や防除体系によって異なり、雑草の量が少ない場合は一発防除と呼ばれる除草効果が長期間持続する遅効性の薬剤を用い、雑草の量が多い場合は効き目が強く、速効性のある薬剤を目的に合わせて数回散布する。

c 水田地帯における止水域ビオトープ

近年、一部の水田地帯において生物多様性を目的としたビオトープの設置が行われており、止水域におけるビオトープは主に休耕田を利用し、いずれは耕作田として復田することを前提に設置されたもの(休耕田利用型)や、圃場整備の際に公共用地や創設換地の利用によってつくられた非農用地において造成されたもの(固定管理型)が存在する(Fig. 38)。以下に、それぞれの特徴を記す。なお、開発サイト内にこれらを設置することで、サイト内のHUの回復に重要な役割を果たす。また、代償ミティゲーションとして近年増加が問題となっている開発サイト外の耕作放棄田や休耕田をビオトープとして利用することで、HU(ハビタット・ユニット)を得ることとなる。

①休耕田利用型のビオトープ

休耕田とは“耕作の意思はあるが耕作していない水田”のことをいう。この休耕田の段階から一歩進んで耕作放棄地となっている水田は全国で約8.4万ha、全水田面積の3.7%(2000年農林業センサス、現在はさらに増加)を占めている。とくに中山間地帯ではこの傾向が強く、休耕田の利活用を含めた対策が望まれている。休耕田をビオトープとして利用する際の利点をまとめると、以下



Fig. 38 休耕田利用型ビオトープ
(茨城県つくば市農村工学研究所)

Biotope using fallow fields (Tsukuba Institute for Rural Engineering, Ibaraki Prefecture)

のようになる。

- 1) 生物多様性の向上に寄与する
- 2) 水田機能を維持しながら休耕ができ、水田の持つ多面的機能を損なわない
- 3) 地域住民による環境保全活動として利活用することで耕作放棄の防止につながる
- 4) 環境教育や都市住民との交流の場として利用できる
- 5) ビオトープとして位置づけることにより、農家や周辺住民の環境への意識が向上する

休耕田利用型ビオトープの普及には、土地所有者である農家の協力や維持管理作業への地域住民の協力が不可欠である。また、ビオトープから復田する際の雑草防除や施肥管理についても、有効な技術の蓄積が望まれる。

②固定管理型のビオトープ

低平地の水田地帯は農作業効率を高めるために、大区画の汎用化水田(麦や大豆といった畑作物の栽培を可能とする水田)に改変されつつある。また、担い手への農地集積による田畑輪換も積極的に展開されているため休耕田は少なく、ビオトープの用地確保には困難が伴う。そこで、公共用地の利用や圃場整備事業時に創設換地を活用して用地を確保することで安定的な保全地として利用できる。なお、固定管理型のビオトープを設置する際は、あらかじめ設置場所や間隔、規模、管理方法などについて十分検討しておく必要があり、整備以前から貴重な生物の生息が確認されている場所(ホット・スポット)は未整備の状態でも保全できるように工夫したい。また、非農用地に設置することから圃場整備時の生物の避難場所としても有効に機能すると考えられ、整備時の HU の低下を抑えることができる。

2 水田のビオトープ利用の効果

a はじめに

水辺の生物の多くは流水域と止水域を棲み分けて生息している。水田を利用したビオトープは、止水域に生息・生育する生物を保全する上で有効な手段となると考えられることから、本研究では慣行栽培による水稻栽培水田

と休耕田利用型ビオトープにおけるトンボの生息状況から、その効果について検証する。

b 調査地の概要及び調査方法

①調査圃場の概要

調査圃場は茨城県つくば市の農村工学研究所内の 1 筆水田(50 × 50m)を通常的水稻栽培を行う水稻栽培区とビオトープ区に畦シートによって分け、各区の成虫とヤゴの生息状況を調べた(Fig. 39)。水稻栽培区は 5 月 16 日に耕起・代かきを行い、5 月 18 日に田植え、6 月 13 日に除草剤(マメット SM 粒剤)を散布し、10 月 10 日に収穫した。ビオトープ区は水稻栽培区と同時期に耕起・代かきを行ったが、一部の区間のみ不耕起・無代かきで管理した。その後、植生の移植等を行わず自然の遷移によった。また、水管理については全ての区画で 5/14 に入水し、9/18 ~ 10/10 までは収穫作業のため一時的に落水し、その後 2/2 まで水深約 10cm で湛水した。

②調査方法

成虫調査はルートセンサス法を用いて行った(Fig. 40)。ルートセンサス法とは調査区を代表する調査ルートを設定し、毎調査同一ルート沿いに出現した個体を記録し、定量的に調査する方法である。本調査では各区の中央部を長辺方向(センサス距離 50m)に向かってルート上に出現したトンボ成虫の種類、数を記録した。また、同時に調査区ごとの植生及び草丈を記録した。調査は 2003 年 6 月 ~ 10 月まで計 11 回行った。

調査はコドラート法により行った。50 × 50cm のコドラート(木枠)を各調査区で 5 地点、無作為に選んでコドラート内にいるヤゴを 2mm 目の手網で採取し、その種類及び数を記録した。また、同時にコドラート内の水面の植被率を被度として 10 段階で記録した。調査は 2003 年 5 月 ~ 04 年 2 月まで計 12 回(7 月、8 月は月 2 回、それ以外は月 1 回)行った。

c 調査結果

①成虫調査

全 11 回の調査で 3 科 12 種のトンボ成虫を目視することができ、オオイトトンボのみ水稻栽培区で確認されなかったが、その他の種はどちらの区画も同一の種が出現

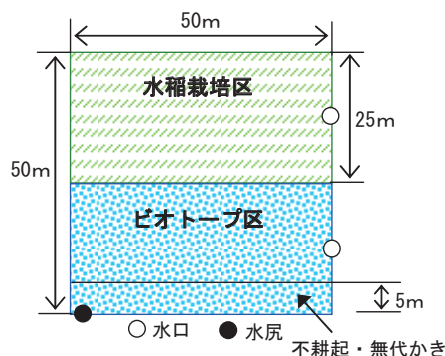


Fig. 39 調査圃場の概要
Outline of surveyed fields



Fig. 40 ルートセンサス法による調査状況
State of survey using route census method

Table 13 成虫調査結果
Results of adult survey

			水稻栽培区	ビオトープ区
イトトンボ科	アジアイトトンボ	<i>Ischnura asiatica</i>	6	26
	アオモンイトトンボ	<i>Ischnura senegalensis</i>	85	425
	キイトトンボ	<i>Ceragrion melanurum</i>	95	101
	オオイトトンボ	<i>Cercion sieboldii</i>		2
トンボ科	シオカラトンボ	<i>Orthetrum albistylum speciosum</i>	35	25
	ショウジョウトンボ	<i>Crocothemis servilia mariannae</i>	12	24
	ナツアカネ	<i>Sympetrum darwinianum</i>	1	4
	アキアカネ	<i>Sympetrum frequens</i>	4	9
	ノシメトンボ	<i>Sympetrum infuscatum</i>	3	7
	ウスバキトンボ	<i>Rhyothemis fuliginosa</i>	1	1
	チョウトンボ	<i>Pantala flavescens</i>	1	1
ヤンマ科	ギンヤンマ	<i>Anax parthenope julius</i>	1	4

(匹/10m/調査回数)

した(Table 13)。個体数の比較では分散分析の結果、ビオトープ区においてアオモンイトトンボのみが1%水準で有意に多く出現していたが、その他では明確な差は見られなかった。

また、調査ルート上の草丈は、水稻栽培区では稲の生長に合わせて均一に高くなっていったが、ビオトープ区では成虫が飛翔し始める6月から植物が繁茂し、ほとんどの成虫の産卵が終わる9月まで20から70cmの草丈を維持し、多様な生息空間をつくっていた(Fig. 41, 42)。イトトンボ科以外の種は飛翔能力が高いため、両区を頻繁に往来している可能性が高いが、水稻栽培区とビオトープ区は共にトンボ成虫の生息空間として利用されていることが分かった。

②幼虫調査

水稻栽培区ではアオモンイトトンボとギンヤンマが少数採取されたのみで、他の種の生息は確認できなかった。一方、ビオトープ区では3科7種のヤゴの生息を確認す

ることができ、個体数も多く採取された(Table 14)。特にアオモンイトトンボは、調査圃場(12.5a)内に推定で約20万、シオカラトンボは約10万匹、ギンヤンマは約9万匹生息しており、かなり高いトンボ保全効果があると考えられる。また、成虫では生息が確認されたトンボ科アカネトンボ属のナツアカネ、アキアカネ、ノシメトンボ、及びウスバキトンボは幼虫の期間が短いため幼虫では採取されなかった。

産卵場所や幼虫の生息空間となるコドラート内の植生被度は、水稻栽培区では除草剤の影響により、一定の密度に抑えられ、植物相(フローラ)も水稻のみの単調な環境となっており、被度は稲の分けつが進む7月以降までほとんどない状態が続き、収穫をした10月以降はほとんどなかった(Fig. 43, 44)。一方で、ビオトープ区は5月下旬から被度が高く、コナギを優占種とし、コウキヤガラ、クログワイ、オモダカ、ホタルイなどの多様な植物相となっていた。また、アオモンイトトンボ幼虫の個

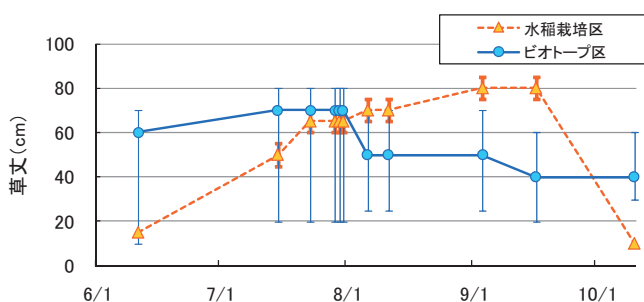


Fig. 41 調査ルート上の草丈 (Max-Min)
Plant height on the survey route (Max-Min)



Fig. 42 各調査区の植物の生育状況
State of vegetation growth in each survey area

Table 14 幼虫調査結果
Results of larval survey

			水稻栽培区	ビオトープ区
イトトンボ科	アジアイトトンボ	<i>Ischnura asiatica</i>		1
	アオモンイトトンボ	<i>Ischnura senegalensis</i>	3	164
	キイトトンボ	<i>Ceragrion melanurum</i>		20
	オオイトトンボ	<i>Cercion sieboldii</i>		5
トンボ科	イトトンボ科s.p.	<i>Coenagrionidae</i> Munz s.p.	1	28
	シオカラトンボ	<i>Orthetrum albistylum speciosum</i>		82
	ショウジョウトンボ	<i>Crocothemis servilia mariannae</i>		31
ヤンマ科	ギンヤンマ	<i>Anax parthenope julius</i>	6	71

(匹/m²/調査回数)

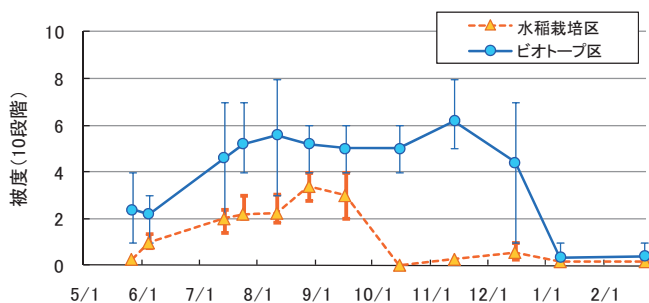


Fig. 43 コドラート内の植生被度 (Max-Min)
Vegetation coverage inside quadrates (Max-Min)

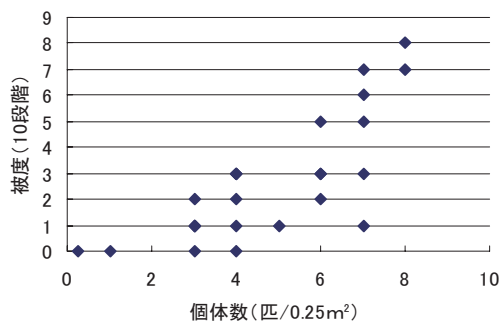


Fig. 45 被度とアオモンイトトンボの個体数 (7月7日)
Coverage rates and number of *Ischnura senegalensis* (July 7th)

体数と調査時に設置するコドラート内の被度との関係についてみたところ、高い相関関係(相関係数: 0.78)がみられた (Fig. 45)。イトトンボ科の幼虫は水草につかまって生息していることから植物の被度と相関がみられたと思われる。

③季節消長と農作業の関係

成虫と幼虫調査で最も個体数の多かったアオモンイトトンボにおいて、産卵の指標となるペアリング数は各区とも十分な個体数を確認し、t検定の結果では両区画に有意な差 ($P < 0.05$) は認められなかった (Fig. 46)。しかし、幼虫個体数は水稻栽培区ではほとんど採取されず、分散分析の結果もビオトープ区が有意 ($P < 0.01$) に多かった (Fig. 47)。主な原因として、水稻栽培区では産卵直後に除草剤の散布が行われており、幼虫の餌資源となるカゲロウ目幼虫の個体密度も水稻栽培区では、ビオトープ区の1/5で有意 ($P < 0.01$) に少なかった (Fig. 48)。他の種についても同様にビオトープ区では6月中旬から個体数が増加しており、水稻栽培区では幼虫が採取されなかった。

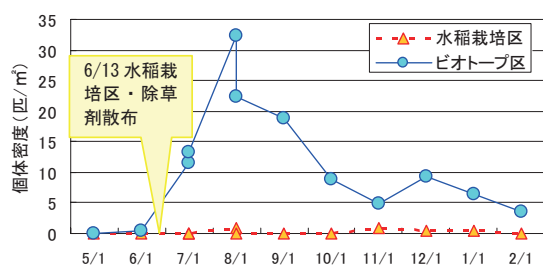


Fig. 47 アオモンイトトンボの幼虫個体数
Larval population of *Ischnura senegalensis*



Fig. 44 コドラート内の植物相の状況 (7月15日)
Status of flora inside quadrates (July 15th)

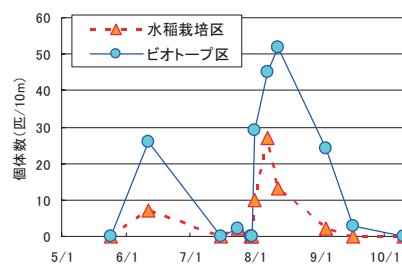


Fig. 46 アオモンイトトンボのペアリング数
Pairings of *Ischnura senegalensis*

d 小括

水稻栽培区は生産を重視するため、植生が単調となり、餌資源も少なかった。また、これまでにフィプロニル系の殺虫剤がアキアカネの初期生育に影響を与えることが示されているが、除草剤についても同様に散布時期や薬剤によっては幾つかの種において初期生育を困難にすることが示唆された。なお、本研究では速効性の除草剤を用いたが、遅効性の除草剤や産卵期を避けた散布をすることで影響を緩和する可能性がある。また、休耕田などをビオトープとして利用すると多様な植物が繁茂し、良好なヤゴの生息場所や成虫の産卵場となることに加えて、農薬などの負の影響もないため、小さい面積でも高い保全効果を発揮することが分かった。

3 耕起・代かきがトンボの保全与える影響

a はじめに

耕起はロータリーティラーを用い、表土の稲株などの有機物を土中にすき込んだり、堅くなった土壌を粉砕す

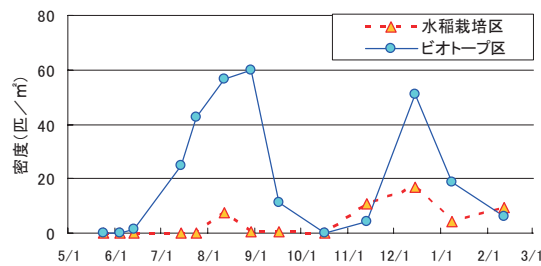


Fig. 48 カゲロウ目幼虫個体数
Larval population of Ephemeroptera

る。また、代かきはロータリーハローを用い、更に碎土することで水田の漏水を防ぎながら、田面を均平にする作業である。これらは、一般的な農作業として行われているが、これらを行わない農法として、不耕起栽培や無代かき栽培といった新しい栽培法もみられるようになってきた。このような新しい農法は、代かきによる濁水を流出しないことから環境に負荷を与えない栽培方法として注目されており、滋賀県の琵琶湖周辺や秋田県の八郎潟周辺で積極的に行われている。

これまでの知見では、無代かき栽培を行うことでアカアネ、ナツアカネ、ノシメトンボの保全に寄与することが示されているが、これらの農法は表土の攪乱を抑えることから他種のトンボ幼虫の保全に寄与すると考えられる。そこで、耕起・代かき前後の幼虫の生息状況を調査した。

b 調査圃場及び調査方法

農村工学研究所内の水田のビオトープ区(25 × 50 m)において、代かき区(5 × 50m)と無代かき区(20 × 50m)を設けた(Fig. 39)。なお、代かき区は5月中旬にロータリーハローで代かきを行った。また、調査方法は前述と同様に、コドラート法を用いてヤゴの生息状況、及び植物の繁茂状況を代かき前と代かき後に調査した。

c 耕起・代かき前後の幼虫の生息状況

無代かき区では5月から6月にかけてアオモンイトトンボ、シオカラトンボの個体数の増加し、アジイトトンボ、オオイトトンボが新たに採取された(Table 15)。一方、代かき区ではアジイトトンボやアオモンイトトンボ、キイトトンボ、アカアネのヤゴの生息が全く確認出来なくなった。また、土中に潜ることができるトンボ科のシオカラトンボは採取されたが、個体数は大幅に減少した。

d 小括

耕起・代かきがアカネトンボに与える影響は産卵時期の田面の乾湿状態が大きいと指摘しているが、本研究では耕起・代かき作業が直接的に幼虫の生息を困難にさせることが示唆された。

また、谷本ら(2003)によると3年に1回は耕起、代かきをしないとヨシヤガマといった大型の抽水植物が繁茂

し、通常の耕作水田として復田するのが困難になる。そのため、休耕田利用型ビオトープでは耕起、代かきによって植生をリセットする必要がある一方で、その作業はトンボ幼虫の生息に悪影響を及ぼすことが分かった。それらの対策として、一筆のほ場内で部分的に耕起、代かきを行う、または幾つかのビオトープをローテーションで耕起、代かきし、生態系への影響を緩和する方法が考えられる。また、耕作水田については、無代かき栽培を行うことで、耕起・代かきを行う慣行栽培よりもトンボ保全効果が高く、圃場整備後のHUの回復を早くすることができる。

4 水深管理がトンボに与える影響

a はじめに

水田の水深は水稻栽培を管理する上で重要な要素となるばかりではなく、水生昆虫であるヤゴの生息環境に与える影響も大きい。これまでに、石田ら(1988)や山本ら(2009)によってトンボ種ごとの水田やため池、湿地といった出現する場所の選好性についての報告はあるが、具体的な水深についての知見はほとんどない。また、新井(1986)によるとアカアネは収穫後の水田の小さな水たまりなどにアカネトンボ属は浅い水深の開放水面に産卵することが知られており、成虫の産卵環境にも影響を与えることから、異なる水深による生息状況について調べた。

b 調査圃場及び方法

水深と産卵の関係を調べるため、農村工学研究所内の独立した水管理が可能なライシメーター圃場(3 × 3 m 区画)4筆の水深をそれぞれ0-5、5-10、10-15、15-20cmで管理した(Fig. 49)。灌漑期間は5月の田植えの際に入水し、9月下旬まで各区画の設定水深を維持したが、その後は落水した。また、各区画では水稻を移植し、無農薬で栽培した。

調査方法は、はじめに羽化殻が確認された7月上旬から9月下旬まで2日1回の割合で各区画から羽化したトンボの羽化殻を調べた。なお、調査は2005年と2006年の2ヶ年行い、2005年についてはアカネトンボ属の同定は属までしか行わなかったが、2006年については種まで同定した。

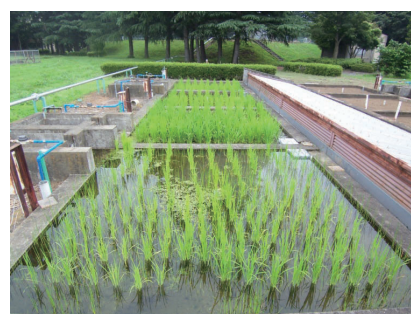


Fig. 49 ライシメーター圃場
Lysimeter fields

Table 15 代かき前後の幼虫調査結果
Results of larval survey at before-after puddling

調査日 植物の被度※	(個体数/㎡)			
	代かき水田		無代かき水田	
	5/13	6/13	5/13	6/13
アジイトトンボ	4.6	0.8	4.2	5.0
アオモンイトトンボ	1.6		0.2	
キイトトンボ	8		1.2	2.2
オオイトトンボ	2.4		0.2	0.2
アカアネ				0.4
シオカラトンボ	1.6			
	8.8	0.8	0.6	0.8

5/14に代かき

※被度は水面の植物の占有率を10段階で表したものと

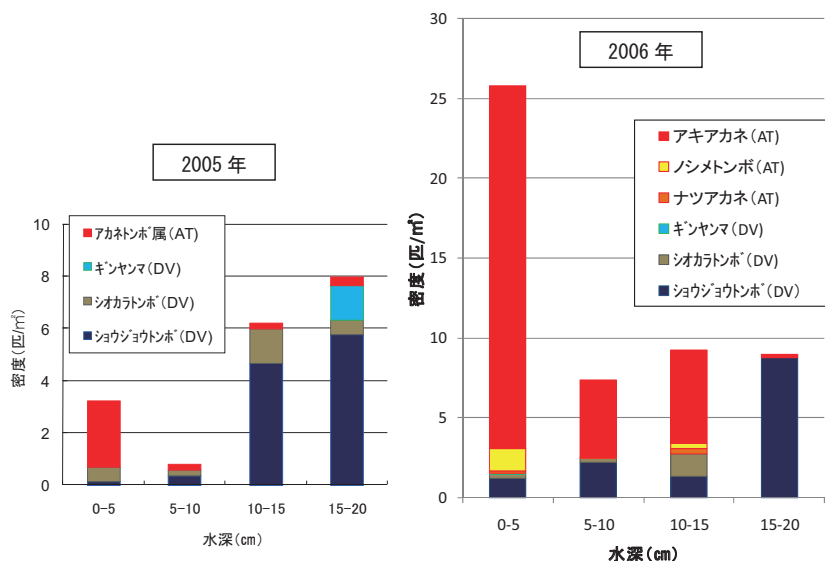


Fig. 50 水深別の羽化殻採取数
Number of nymphal cases collected by water depth

c 調査結果

アカネトンボ属は既存の知見通り、浅い水深に多く確認された (Fig. 50)。本調査水田は無農薬栽培を行ったが、適正に管理すればアカアカネのように10a区画あたりの推定で約2万匹の個体を保全できることが分かった。また、ナツアカネは水深10-15cmで推定300匹/10a、ノシメトンボは水深0-5cmで推定1,400匹/10aが羽化していた。アカネトンボ属において、水田地帯を代表するアカアカネ、ナツアカネ、ノシメトンボの3種の羽化が確認されたことから、非灌漑期に落水する水管理を行っても、生活環タイプがATの種は繁殖可能であることが確認された。

また、ショウジョウトンボは水深10cm以上で多く、シオカラトンボは水深10-15cmで比較的によく採取され、ギンヤンマは水深15-20cmでしか確認されなかった。通常の水田では水深10cm未満で管理することが多いが、10cm以上の深水管理を好む種がいることが分かった。これらの種は生活環タイプがDVであり、田植え後に別の場所で越冬した世代(一昨年の第2世代)が飛来して産卵、羽化したと考えられ、灌漑期間のみの湛水でもDV種の第1世代は種の供給があれば繁殖可能であることが確認された。

d 小括

異なる水深管理によって、成虫の産卵や羽化数に変化をもたらしていた。そのため、水田の画一的な管理はトンボの単純化を招く恐れがあり、多様な水深管理によって多くのトンボ種にとって良好な生息地となることが示唆された。また、ビオトープにおいては、固定管理型では田面を傾斜させて人工的に水辺のエコトーン(移行帯)を造成したり、休耕田利用型では、水田内に溝切り機などを用いて、通常の水管理よりも10cm程度深くなるよ

うな溝を掘削することで、多様な生息環境を創造することができると思われる。なお、本調査では非灌漑期に落水する一般的な水管理を行ったが、AT種とDV種の第1世代は繁殖可能であることも確認された。

5 まとめ

a 営農によるトンボ保全

本研究では、ビオトープとして利用した水田と慣行の水稲栽培を行う水田においてトンボの生息状況を比較することで、慣行農法がトンボの生息に与える影響について明確にした。その結果、耕起・代かきによって表土を攪乱することで幼虫の生息を困難にすることや、殺虫剤や除草剤の散布によって幼虫の生息への直接的な影響と、生息場所である植生や餌資源への間接的な生息環境の悪化について明らかにした。

それらの影響を緩和する栽培方法として、不耕起栽培や無代かき栽培があり、中でも無代かき栽培は近年個体数が激減しているアカアカネの保全に寄与する。また、近年は無農薬・有機栽培によって、雑草や害虫の発生を抑えながら水稲栽培を行い、かつ生態系にも優しい環境保全型農法が確立されつつある。その代表的な農法として、冬期湛水水田が全国に普及し始めており、そのトンボ保全効果については、次章においてまとめた。なお、営農によるトンボ保全はビオトープに比べて生息密度は低くなるが、農業生産と生態系保全が一体化した技術は農家にもメリットとなり、取り組み面積の拡大によってはスケールメリットを活かすことが可能とることから、整備後のHUの回復に大きく寄与すると思われる。

b 水田のビオトープ利用によるトンボ保全

水田をビオトープとして利用した場合、多様な植生が繁茂し、成虫の産卵や幼虫の生息場所として良好な環境

となることや農薬などの負の要因がないことから、限られた面積においても高いトンボ保全効果を発揮することが分かった。そのため、ミティゲーションにおける「代償」に相当する処置として、ビオトープを設置することで整備後のHUの回復に寄与し、それらのビオトープを適切に配置することで整備サイト内及び事業サイト外とのネットワーク化が図れ、各トンボ種においてメタ個体群として保全可能となる。なお、効果的なビオトープの面積規模や維持管理技術については今後、さらなる知見の蓄積が必要である。

V 冬期湛水水田によるトンボ保全効果

1 冬期湛水水田とトンボの保全

a 冬期湛水水田とは

冬期湛水は「ふゆ・みず・たんぼ」と呼ばれ、冬期の水田に湛水してガンやハクチョウといった冬鳥の越冬地（主に採餌場）として利用する活動である（Fig. 51）。冬期の湛水はタマガヤツリやアゼナ、キカシグサなどの水田雑草の繁茂を抑制するとともに、水鳥がコウキヤガラなど雑草の塊茎を食べて個体数を減少させる。これらの働きにより水稻の有機栽培が省力化でき、そこで生産された米は生態系に配慮した有機米、または減農薬米として人気を呼んでいる。また、平成19年度から始まった農地・水・環境保全向上対策における営農活動支援の対象となっており、全国各地にその取組が広がっている。



Fig. 51 冬期湛水水田と環境保全米
Winter flooded paddy and eco-friendly rice

b トンボ幼虫の保全について

前述の「圃場面の乾燥化がトンボ幼虫に与える影響」におけるポット試験の結果から、非灌漑期の乾田化によって、土質による違いはあるが、低平地水田地帯に多くみられる重粘土壌では約10日程度で乾燥に弱いとさ



Fig. 53 ため池地帯
Reservoir zonerice



Fig. 54 低平地水田地帯
Lowland paddy zonerice



Fig. 55 谷津田地帯
Narrow valley paddy zonerice

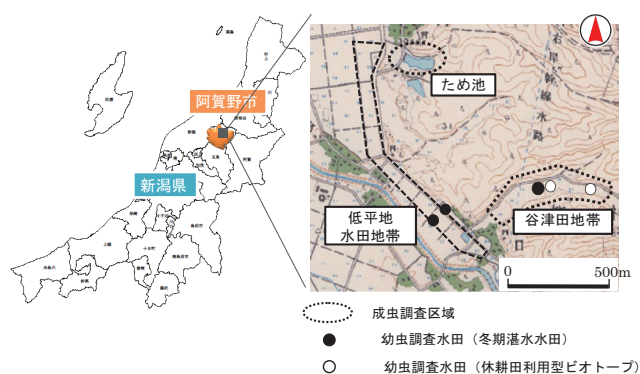


Fig. 52 調査地区の概要
Outline of the survey area

れるアオモンイトトンボ幼虫は全滅することから、トンボ幼虫にとって非灌漑期の湛水は乾燥と寒さから守る上で不可欠である。さらに、農薬を使用しない冬期湛水水田は幼虫の生息環境としても適しており、高い保全効果が期待される。そこで本研究では、実際に冬期湛水を実践している現地圃場において、灌漑期と非灌漑期のトンボの生息状況を調べることでその効果を検証し、ミティゲーションする際により保全効果の高い営農方法の提示を目的とした。

2 調査地概要及び調査方法

a 調査地の概要

新潟県の北部に位置する阿賀野市笹神地区を調査地とした（Fig. 52）。本調査地では1980年頃から広範囲にわたって減農薬による特別栽培米を栽培しており、地域的な取組として環境保全に力を注いでいる。近年は冬期湛水を取り入れた有機栽培を行っており、ハクチョウやメダカ、ホタルの保全に効果をあげている。なお、調査は五頭連峰の山麓沿いの谷津田地帯と緩傾斜の低平地水田地帯、及びため池でそれぞれ行った。

b 調査方法

①成虫調査

成虫調査はルートセンサス法を用いて、2007年7月と2008年7月の計2回、各調査区域を周回して出現種や個体数を地図上にプロットした（Fig. 52）。また、調査は午前10時から2時間程度かけて各区域の調査ルートをまわり、それぞれの距離はため池430m（Fig. 53）、



Fig. 56 低平地水田地帯冬期湛水水田
Winter flooded paddy in the lowland paddy zone



Fig. 57 谷津田地帯冬期湛水水田
Winter flooded paddy in the narrow valley paddy zone



Fig. 58 谷津田地帯休耕田利用型ビオトープ
Biotope using fallow fields in the narrow valley paddy zone

低平地水田地帯 1,800m (Fig. 54), 谷津田地帯 1,030m (Fig. 55) であった。

②幼虫調査

幼虫調査は 50 × 50cm の木枠を各調査水田で 4 回設置し、枠中のヤゴを採取するコドラート法を用いて、2006 年 6 月と 11 月、2007 年 7 月と 11 月、2008 年 7 月と 11 月の計 5 回行った。調査水田は低平地水田地帯では冬期湛水水田 2 筆 (Fig. 56), 谷津田地帯では冬期湛水水田 1 筆 (Fig. 57) と生物多様性を目的とした通年湛水を行う休耕田利用型のビオトープ 2 筆 (Fig. 58) でそれぞれ行った。なお、各水田とも湛水深は 0 ~ 5cm 程度で、土壌は排水性の悪い重粘土壌である。

3 調査結果及び考察

a 成虫調査結果

調査地区のトンボ種のポテンシャルを確認するため、恒久的な水域であるため池で成虫調査を行い、17 種のトンボ成虫を確認した (Table 16)。止水域性のチョウトンボやショウジョウトンボ、キイトンボを中心に、近年、各地で絶滅が危惧されているハッチョウトンボを高い密度で確認することができた。また、林縁部に生息するコヤマトンボやコオニヤンマなども採餌場として利用しており、トンボの生息に良好な場所として機能している。また、ビオトープ水田及び冬期湛水を行っている谷津田地帯では、主に水田に生息するアオモンイトトンボを中心としたイトトンボ科やシオカラトンボを中心としたトンボ科の種、さらに流水域に生息するオニヤンマなど 15 種の成虫を確認した。一方で、低平地水田地帯では、キイトンボとシオカラトンボ、アキアカネが低密度で確認された。

b 幼虫調査結果

低平地地帯の冬期湛水水田は、灌漑期ではオオイトトンボとアオモンイトトンボが低密度で採取され、非灌漑期ではシオカラトンボのみが採取された (Table 17)。また、成虫調査では多くのトンボを確認することができた谷津田地帯の冬期湛水水田は、シオカラトンボのみが低密度で採取された。生活環タイプでは、多化性種 (DV) しか確認できず、非灌漑期に生息していたのはシオカラトンボのみであった。なお、シオカラトンボは前述の「圃

場面の乾燥化がトンボ幼虫に与える影響」において、乾田状態でも土中に潜って生息できることが確認された種である。一方、谷津田地帯のビオトープ水田は、オオイトトンボやクロイトトンボ、キイトンボやエゾイトトンボなどが高密度で生息していた。生活環タイプでは、春種 (SP)、夏種 (SM)、多化性種 (DV) と複数のタイプが生息しており、非灌漑期も生息が確認できた。

c 冬期湛水水田の水管理とトンボのライフサイクル

冬期湛水水田は湛水管理を長期間するため、コンバインによる収穫を行うには収穫前に地耐力向上を目的とした落水期間を設ける必要がある。実際に冬期湛水水田では、8 月頃から間断灌漑が行われ、9 月から 10 月は水面

Table 16 成虫調査結果
Results of adult survey

		ため池	谷津田地帯	低平地水田地帯
イトトンボ科	オオイトトンボ	2.7	0.8	
	キイトンボ	16.4	1.9	0.5
	アオモンイトトンボ		5.2	
	クロイトトンボ	4.1	0.1	
アオイトトンボ科	アオイトトンボ		0.4	
ヤンマ科	ギンヤンマ	2.6	0.2	
オニヤンマ科	オニヤンマ		0.7	
エゾトンボ科	コヤマトンボ	0.2		
サナエトンボ科	コオニヤンマ	0.1		
トンボ科	ウスバキトンボ		0.1	
	ハラビロトンボ	0.5	0.2	
	コフキトンボ	0.9		
	シオカラトンボ	1.3	9.2	0.3
	オオシオカラトンボ	4.3	0.5	
	ショウジョウトンボ	11.9	1.1	
	アキアカネ	0.1	2.2	0.1
	ノシメトンボ	0.6	1.7	
	ヨツボシトンボ	0.3		
	ハッチョウトンボ	6.2	1.0	
	チョウトンボ	43.1		
	コシアキトンボ	2.6		
合計種数		17種	15種	3種

単位：個体数/100m/調査回数

Table 17 幼虫調査結果
Results of larval survey

	生活環タイプ	低平地地帯		谷津田地帯			
		冬期湛水水田		冬期湛水水田		ビオトープ水田	
		灌漑期	非灌漑期	灌漑期	非灌漑期	灌漑期	非灌漑期
オオイトトンボ	DV	0.4				17.8	10.9
アオモンイトトンボ	DV	0.4				3.3	8.9
アジイトトンボ	DV						0.3
クロイトトンボ	DV					1.3	
シオカラトンボ	DV		0.3	0.5	0.7	5.3	7.8
ギンヤンマ	DV					3.0	1.3
エゾイトトンボ	SP					0.3	3.7
ヨツボシトンボ	SP						0.7
キイトンボ	SM					0.5	

単位：個体数/m²/調査回数

がない状態であった(**Fig. 59**)。そのため、既に産卵を終えて卵もしくは幼虫の状態である SP 種, SM 種, DV 種の第 2 世代は生息が困難であると思われる。なお, DV 種は 1 年に 2 世代出現するため, 春に種の供給(成虫の飛来・産卵)があれば第 1 世代の繁殖は可能であると思われる。また, 幼虫調査で確認できなかったアカネトンボ属を代表とする AT 種は, 耐乾燥性の卵で越冬することから, 乾田状態でも条件が整えば繁殖が可能であると思われる。

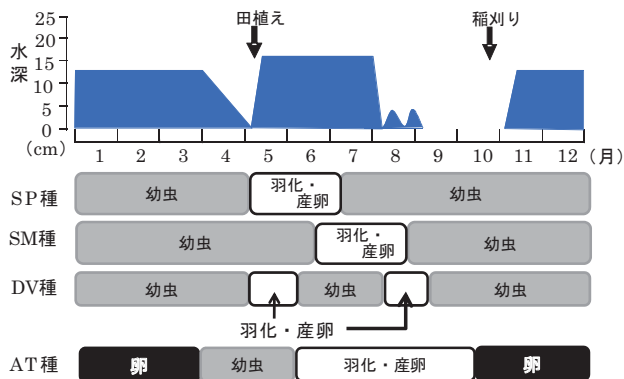


Fig. 59 トンボの生活環と冬期湛水水田の水管理
Life cycle of the dragonfly and water management of winter flooded paddies

d その他の冬期湛水水田の水管理

嶺田ら(2009)によると, 宮城県大崎市田尻伸萌地区における水管理は新潟県笹神地区と同様に収穫前の 9 月上旬から落水をし, 収穫作業経て 12 月中・下旬～2 月末まで湛水して, 3～4 月は耕起作業のために圃場を乾燥させていた。

兵庫県豊岡市において実施されている「コウノトリ育む農法」においては, 稲刈りの 2 週間前後頃から自然落水し, 秋は乾田化して漏水対策(畦塗りや畦シートの設置)や米ぬかの散布をすることを推奨している。また, 豊岡市の一部の冬期湛水水田では「水田の生きものの逃げ場」を設置している(**Fig. 60**)。その効果については笠原(2006)によって魚類やヤゴなどの一時的な避難場所として機能していることが報告されている。

e トンボ幼虫以外の底生生物

トンボ幼虫以外の底生生物では, トンボ幼虫と同様に通年湛水のビオトープで多く採取されており, 非灌漑期



Fig. 60 水田の生きものの逃げ場(兵庫県豊岡市)
Refuge for paddy organisms (Toyooka, Hyogo Prefecture)

も採取されていることから繁殖場所として機能していると思われる(**Table 18**)。ドジョウはシオカラトンボと同様に土中に潜ることができることから冬期湛水水田の非灌漑期においても生息が確認された。また, アメリカザリガニは水田内に穴を掘ったり, 水田から移動して収穫時期の落水期間の乾燥を回避することができる。このように, ドジョウやアメリカザリガニのように一時的な落水から避難できる生物にとって冬期湛水水田は, 冬期の寒さから守ってくれる良好な越冬の場として機能することが示唆された。しかし, 本調査地のようにアメリカザリガニといった外来生物が生息する場合は, 他の生物を捕食し, 生物多様性の低下を招く可能性がある。なお, 本調査地の冬期湛水水田ではアメリカザリガニによる巣穴の掘削により湛水深の維持が困難になるといった問題が発生した。

Table 18 底生生物調査結果
Results of benthos survey

	低平地帯		谷津田地帯			
	冬期湛水水田		冬期湛水水田		ビオトープ	
	灌漑期	非灌漑期	灌漑期	非灌漑期	灌漑期	非灌漑期
カゲロウ目幼虫	26.0	0.3	2.5		31.8	47.2
ゲンゴロウ類		0.3				14.1
ガムシ類	2.2		2.5			
ホタル幼虫			5.0			
ドジョウ	3.0		7.0	1.3	12.5	4.3
アメリカザリガニ	0.3	8.2		1.3	0.5	6.0
ヨコエビ	0.2					9.3
コオイムシ					1.0	
タイコウチ			0.5		0.3	

単位: 個体数/m²/調査回数

4 冬期湛水水田におけるトンボ保全効果

現行の冬期湛水水田は, 冬期の湛水を始める前に多くの個体が生存困難となることから, トンボを保全するには不十分であることが分かった。また, 冬期湛水水田では種の供給があれば DV 種の第 1 世代は繁殖可能となるが, 谷津田地帯では, 成虫は十分に生息していたのに対し, 幼虫は少なかった。この要因については, 冬期湛水水田における産卵や孵化, 幼虫の育成状況について調査する必要がある。

また, 通年湛水のビオトープ水田は DV 種以外に SP 種や SM 種が生息しており, 安定的な種の供給源となることが分かった。なお, 冬期湛水水田においてトンボ類を保全するには収穫前の乾燥からヤゴを守ることが必要であることから, 圃場内に明渠等を掘削して乾燥時の一時的な避難場所をつくることで保全できる可能性がある。なお, 一時的な落水から避難が可能で, 冬期に個体数を減少させていた種は, 冬期湛水をすることで保全の可能性が高くなる。一方で, 外来生物(アメリカザリガニやウシガエルなど)にとって冬期湛水は, 良好な越冬場所として利用され, 在来の生物の捕食圧を高めてしまう可能性があることから, その運用には注意する必要がある。

Ⅵ 結 言

1 圃場整備事業が止水域性トンボに与える影響と対策

現地圃場調査と乾燥に弱いアオモンイトトンボ幼虫の耐乾燥・低温試験から、圃場面の乾燥が進行すると、乾燥や低温に強いごく一部のトンボ幼虫を除く、ほとんどのトンボ幼虫は乾燥死してしまうことが分かった。そのため、圃場整備事業による表土の攪乱・乾燥は、止水域性トンボの生息を困難にする。特に、事業は非灌漑期に行われることが多いため、その時期に水田内に卵や幼虫として生息する種に対する影響が大きく、生活環タイプではトンボ種の大部分を占めるSP種、SM種、AT種、DV種の止水域性トンボは生息が困難になることが分かった（Fig. 61）。また、整備後も暗渠排水整備の効果により乾田化が進行するため、止水域性トンボの生息場所として適さない可能性が高い。さらに、生息場所のネットワークの分断が起こると種の供給がなくなり、個体数の回復がされなくなるため、移動能力が高く、乾田状態でも生息できる種しか生息しなくなることから、ミティゲーションによる保全対策が不可欠となる。

2 圃場整備事業によるミティゲーション（回避）

ミティゲーションは、回避、最小化、代償の優先順で検討を行う。そのため、圃場整備事業によるミティゲーションを考える際、まずは事業の可否について検討することが必要である（Fig. 61）。土地改良法の改正（平成13年）によって事業の実施に際して、地域住民を主体とした「田園整備環境マスタープラン」または「農村環境計画」を作成することが事業採択の要件となっている。これはそれぞれの地域における農村環境の状況や住民の意向を十分把握した上で、環境保全の目標やこれを達成するために必要な対策の基本方針を定めた計画を策定し、農村地域の環境保全を総合的かつ効率的に図ることを目的としている。よって、地域住民が目標とする農村環境が達せられず、事業によるデメリットがメリットを上回る場合は事業の中止も検討することが必要である。

事業を実施する場合は部分回避を行う（Fig. 61）。整備を行っても排水不良が改善されない場所や立地的に区画整理がしにくい場所など、圃場整備の効果が低いエリアについては部分的な事業の回避をする。また、一部の湿地環境を保全することで、整備時の事業サイトのHU（ハビタット・ユニット）の低下を抑えることができると共に、整備後の種の供給源となり、HUの回復にも寄与する（Fig. 2）。なお、保全地の確保については、公共用地の利用や創設換地によって非農用地を捻出することで、従来から貴重な生物の生息が確認されている場所（ホット・スポット）を固定管理型のビオトープとして管理するといったことが想定される。その際、設置する場所や数、間隔、規模及び管理技術などの知見の蓄積が

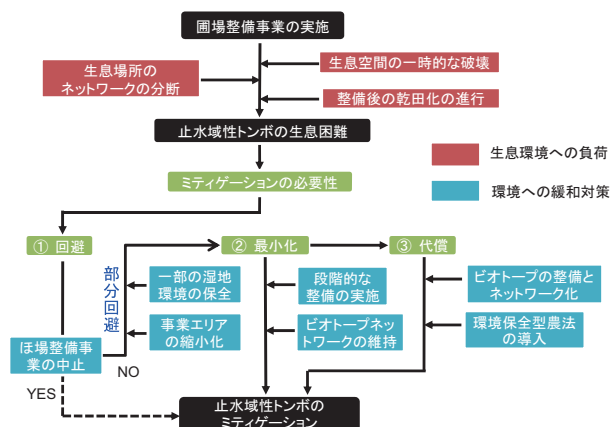


Fig. 61 止水域性トンボのミティゲーションフロー
Mitigation flow of stagnant water dragonflies

必要となる。

3 圃場整備事業によるミティゲーション（最小化）

a 段階的な整備の実施

保全地の確保が困難な場合は、一度に全面的な施工を行うのではなく、段階的な施工を行うことによって、一時的な環境破壊を緩和する「最小化」が考えられる（Fig. 61）。整備を行わなかった地区が整備を行った地区の種の供給源となり、整備による種の消滅を防ぐことが可能となる。その際、各トンボ種が移動して繁殖できるような処置が必要となる。

b 生息地間のネットワークの分断

圃場整備事業を実施する際、移動能力の低いアジアイトトンボの移動可能距離である1.1～1.2km以内の間隔で生息地を確保しないと、イトトンボ科の種や移動能力の低い種において事業サイト内の止水域のネットワークは分断されることが分かった。

そのため、圃場整備時の止水域性トンボの保全地は、周囲に障害物などがない理想的な立地の場合、約400haに1カ所の割合で確保することで整備時にネットワークを分断することなくHUの低下を抑えることができるが、保全地の設置は事業規模や配置場所、地形条件によって変化するため2カ所以上設置することが望ましい。また、止水域性トンボの多様性を確保するネットワークを維持しながら工事することで、ミティゲーション（最小化）に繋がるが、保全地の確保は困難な場合が多い。その場合は事業後のネットワークの再構築が不可欠となる。

c 生息地間のネットワークの構築

事業によって生息地間のネットワークが分断または消滅してしまう場合は、事業後にネットワークの再構築が不可欠である。特にネットワークが消滅してしまった場合は、他の地域（事業サイトの外）から種の供給が不可欠となることから、事業サイト外に対象となるトンボ種の供給源が移動可能な距離に存在するか事前調査が必要となる。一般的な環境アセスメントは事業サイトのみの

調査しか行わないが、ネットワークの消滅が想定される場合は、周辺地域を含めた調査を要件として加える必要がある。なお、それには各トンボ種の移動距離やメタ個体群の規模についての知見の蓄積が不可欠となる。また、ネットワークが分断された場合は、アジアイトトンボの移動可能距離である 1.1 ～ 1.2km 以内に生息地を確保することで再構築は可能であるが、圃場整備後の事業サイト内の HU の向上には、より確実に活発なネットワーク化を図る必要があり、それにはアジアイトトンボの行動範囲である 400m 以内に繁殖可能な生息地を設けることが重要である。

4 圃場整備事業によるミティゲーション（代償）

a ビオトープの設置による保全

部分的な回避や最小化による HU の回復が充分でない場合、代償に相当する行為によって補い、最終的にノー・ネット・ロスを目指す (Fig. 61)。圃場整備事業の場合、回避や最小化は難しいため、実際にはこの代償の行為が重要となると思われる。

ビオトープは一般的な水稲栽培水田と比べて、多様な植生が繁茂し、成虫の産卵や幼虫の生息場所として良好な環境となることや農薬などの負の要因がないことから、限られた面積においても高いトンボ保全効果を発揮することが分かった。そのため、ミティゲーション（代償）として、ビオトープを設置することで整備後の HU の回復に寄与する。

①ビオトープの管理方法

トンボを効果的に保全するビオトープの管理方法は、非灌漑期にヤゴが越冬できるように湛水状態を維持することが必須条件となる。また、種によって異なる水深を好むことから、多様な水深で管理する。なお、複数のビオトープが確保できない場合は、ビオトープ内の圃場面

に傾斜をつけることで、深い水深から浅い水深、及びエコトーン（移行帯）を確保することができる。また、植生は 3 年に 1 回は耕起しないとヨシやガマといった大型の抽水植物が繁茂し、一部のトンボ種の産卵に適した開水面がなくなってしまう。一方で、耕起や代かきはその場に生息するヤゴの生息を困難にすることから、複数のビオトープ、またはビオトープ内のエリアごとにローテーションで行う必要がある。

②ビオトープの設置方法

ビオトープには固定管理型と休耕田利用型があり、固定管理型は圃場整備前に非農用地を捻出したり、整備後にできてしまう三角地（圃場の形状が四角形ではなく作業性の悪い区画）やつぶれ地などを利用して設置する。休耕田利用型は減反によって休耕している水田を用いて、耕作田として復田できるように管理しながら生態系保全を行う。これらのビオトープの管理については、適切な水深や植生遷移についての知見の蓄積が必要であり、それには止水域性トンボや他の生物の生息状況をモニタリングし、状況に応じた管理（順応的管理）が不可欠である。

b 環境保全型農法の導入による保全

①一般的な水稲栽培水田

これまでの調査結果から、慣行的な水稲栽培のトンボ保全効果は低いことが分かった。主要な要因としては、9 月以降から代かきを開始する 4 月中旬まで水田が乾燥化しているため、その間に幼虫として生息する SP 種、SM 種、DV 種のトンボ幼虫の多くは死滅してしまう (Fig. 62)。なお、土中に潜ることができるトンボ科の乾燥や寒さに強い種は個体数は減少するが生息できる可能性がある。また、アキアカネやナツアカネが属する AT 種は耕起、代かきによる影響や農薬（主に箱施用のフィプロニル系の殺虫剤）によって生息数が著しく減少する。



Fig. 62 一般的な水田の管理方法（関東地方）
Usual method of paddy management (Kanto region)

成虫で越冬する WT 種は春に産卵して夏場は幼虫として生息しているが、6月下旬ごろからの中干しによって生存が困難になるとと思われる。

②トンボ保全を重視した環境保全型農法

水稻栽培水田においてトンボを保全する場合、非灌漑期の乾燥や農薬散布、耕起・代かきが著しく生息環境を悪化させることが分かった。本研究では、個々の要因についての影響を調査したが、栽培期間を通じて全ての管理作業がトンボ保全に適した営農体系でないとならない。環境保全型農法として既に普及している冬期湛水水田においても、水管理の面で問題があり、トンボの保全効果は発揮していなかった。そのため、トンボ保全を重視した環境保全型農法として、従来から実践されている不耕起栽培や無農薬栽培、冬期湛水水田をトンボのライフサイクルに合致するように改良することで、営農とトンボ保全の両立を図った。

【無農薬・不耕起栽培】

一般的な農法と大きく異なるのは、無農薬で不耕起栽培を行うことに加え、活着期後からの深水管理を7月下旬まで行うことである (Fig. 63)。これによって、農薬や中干しによって生息環境を悪化させていた AT 種と WT 種、及び DV 種 (第1世代) の生活環であるトンボ種の保全が可能である。なお、中干しを行わないことから、収

穫時の地耐力低下が懸念されるが、出穂後の8月中旬以降から落水し、圃場整備事業によって整備された暗渠排水によって速やかに圃場を乾燥させればコンバイン収穫は可能である。なお、無農薬や中干しをしないことによる無効分けつの助長によって水稻は減収するが、農地・水・環境保全向上対策による営農活動支援による補助、または環境保全米 (赤とんぼ米など) による単価の向上によって補うことができると思われる。

【冬期湛水水田 (改良型)】

従来から行われている冬期湛水水田は収穫の1ヶ月前から落水し、地耐力を向上させていたため、その間に多くの種の生息環境を悪化させていた (Fig. 59)。そこで、地耐力を向上させる時期を通常の中干しと同じ6月下旬から行う (Fig. 64)。また、その後の水管理は8月上旬～中旬の出穂期以外を除き、水面が多少見えるような水管理 (飽水管理) をすることで地耐力を維持しながら灌漑する。なお、土が湿った状態であれば、重粘土の場合1ヶ月後のヤゴの生存率は約80%を維持できる。その後、収穫期前に落水し (落水しても重粘土の水田では10日間は幼虫も生存可能)、暗渠排水によって地耐力が回復したらコンバインによる収穫を行い、その後湛水を再開する。

トンボは飽水管理の間に SP 種と SM 種が水田内に産

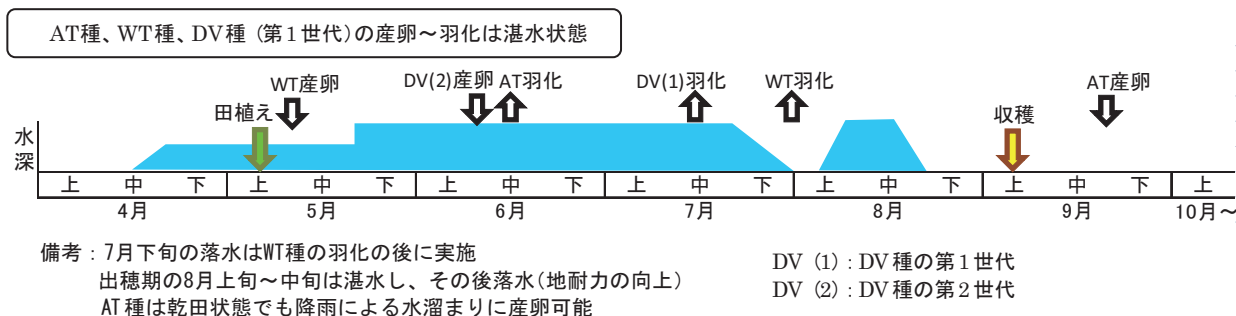


Fig. 63 無農薬・不耕起栽培によるトンボ保全
Dragonfly conservation by chemical-free, zero-tillage cultivation

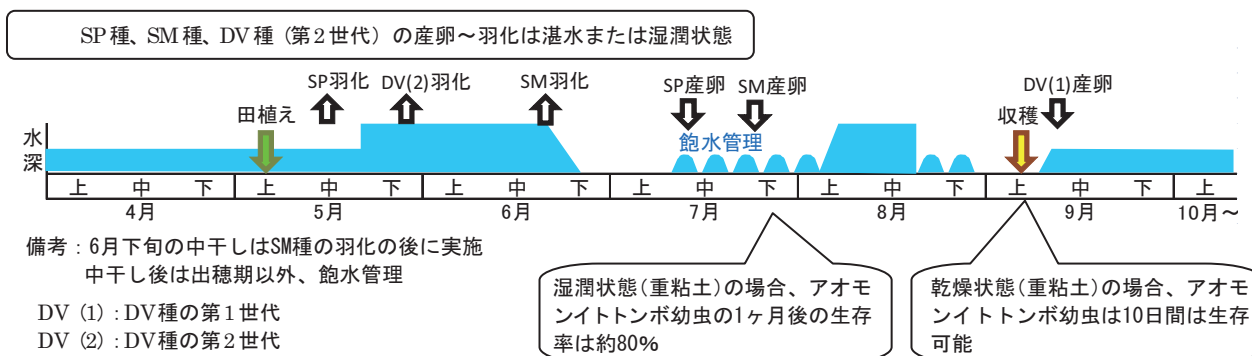


Fig. 64 冬期湛水水田 (改良型) によるトンボ保全
Dragonfly conservation by winter flooded paddies (improved type)

卵し、収穫直後に DV 種(第 1 世代)が産卵する。非灌漑期も含め、湛水を継続することで SP 種や SM 種、DV 種(第 2 世代)の保全が可能である。

全てのトンボ種(5つのライフサイクルパターン)を保全する場合、1 年中湛水をしなくてはならないが、上記に提案した 2 つの農法を同一地区内で組み合わせることによって、全てのライフサイクルパターンの産卵から羽化までを可能とした。なお、提案した環境保全型農法は、地域によって栽培暦やトンボの発生時期が異なることから、収量や作業性を極力低下させずにトンボ保全を可能とする順応的管理を適応させながら、地域ごとに確立していく必要がある。

また、環境保全型農法によるトンボ保全はビオトープに比べて生息密度は低くなるが、農業生産と生態系保全が一体化した技術は農家にもメリットとなり、取り組み面積の拡大によってはスケールメリットを活かすことが可能となり、ミティゲーション(代償)として整備後の HU の回復に大きく寄与すると思われる。

5 圃場整備事業へのミティゲーションに向けた検討課題

ミティゲーションによるノー・ネット・ロスを目指すには HEP(Habitat Evaluation Procedure)などの評価手法を用いて評価をすることが不可欠である。そのためには、各トンボ種において、乾田化の有無や農薬散布の有無、植生、餌資源などの生存必須条件を選定し、各環境要因ごとの適正度から SI(Suitability Index: 適正指数)を求め、SI モデルを作成する(図 65)。さらに各環境要因の SI モデルから幾何平均または特定の環境要因を重み付けした幾何平均によって HIS(Habitat Suitability Index: ハビタット適正指数)モデルを作成し、対象となる面積を乗じて HU を求める必要がある。HEP に向けたこれらの知見を蓄積することによって、最終的に HU が算出され、圃場整備事業の前後で減少した環境要因の特定や減少した環境要因の質及び空間的な価値が判明する。また、圃場整備の前後を含め、定期的にモニタリングをすることで時間的価値を定量的に評価することができ、順応的管理による効果的な生息環境の回復がされ、止水域性トンボのノー・ネット・ロスや今後実施されるミティゲーションの質の向上に寄与することが可能となる。

また、ミティゲーションには影響を受ける環境そのもの(事業計画区域)に対して環境緩和措置を施す、オン・サイト・ミティゲーションと影響を受ける環境ではなく、それ以外の場所で環境保全に寄与する行為を行うオフ・サイト・ミティゲーションがある(田中, 1995)。本研究では主に事業計画区域内の止水域でのミティゲーションについて述べてきたが、トンボの中には長距離の移動が可能な種や、未成熟期(羽化後の成虫が性成熟するまでの期間)は林内に移動して生息する種、アキアカネのように未成熟期は山間部まで移動するような種が存

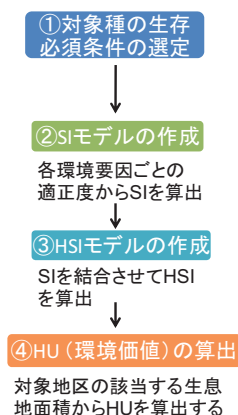


Fig. 65 HEP による環境価値 (HU) の算出手順
Procedure for calculating environmental value (HU) using HEP

在する。そのため、事業サイトのみの保全では十分な保全ができない可能性があることから、オフ・サイト・ミティゲーションについても検討する必要がある。特に管理されなくなった雑木林や中山間地の耕作放棄水田などの整備についても行政や NGO 団体などの協力によってミティゲーションの一部に組み込んでいく必要がある。

本研究では、ヤゴの耐乾燥能力や成虫の移動可能距離をトンボの中でもそれらの能力が低い種を用いて、現地調査や実験によって具体的な数値を明らかにした。それによって、トンボの多様性を確保するための基準の一つとなる数値を示した。しかし、保全にはトンボのライフサイクル(図 3)を確保する必要がある。産卵やヤゴの生息、羽化、及び成虫の生息に必要な環境などについての知見はまだ十分でない。生息場所についても、植生や水深によるヤゴの生息状況の傾向について明らかにしたが、水深や水温、水質やビオトープを管理する際の植物の草丈や被度(植物が水面を覆う割合)などについての知見は不足している。さらに、平地や傾斜地、中山間地、谷津といった立地環境などによっても保全方法は変化すると思われる。また、特異的に生物が多く住むホット・スポットについても、未だ要因が解明されない部分が多くあり、事業地区内における局所的な要因も考慮しながら整備するには順応的な管理を含めた管理方法の知見や技術の蓄積も必要である。今後、これらの知見を集積することによって、圃場整備時により効果の高いミティゲーションが実施でき、伝統的な農法に適応してきたトンボが、整備の行われた近代的な農法に変化しても生息できる農村にすることが可能であると思われる。さらにトンボの保全は農村振興や環境保全型農法の確立に寄与することが期待できるとと思われる。

参考文献

- 新井 裕(1979): アジイトトンボの交尾と成熟雌の拒否行動, 昆虫と自然, 14, 6, 38-40
- 新井 裕(1986): アキアカネの卵の耐乾性, インセクトリウム, 23(6)
- 新井 裕(1983): 干上った湿地におけるトンボ幼虫の越冬生態, 月刊むし, 146, 15-17
- 新井 裕(1984): 干上った湿地におけるトンボ幼虫の生息状況, TOMBO, X X VII, 32-34
- 新井 裕(1996): 水田に適応したアカトンボ, 昆虫と自然, 31(8), 23-26
- 新井 裕(2001): トンボの不思議, どうぶつ社
- 有瀬英憲・本林 隆・斎藤邦行・塩谷哲夫(1999): 水田における農薬の無施用が水稻の生育・収量, 節足動物および雑草群集に及ぼす影響, 農作業研究, 34, 4, 231-241
- 石田勝義・村田道雄(1992): トンボ類の幼虫に対する水田施用農薬の影響, 名城大農学報, 28, 1-12
- 石田昇三・石田勝義・小島圭三・杉村光俊(1988): 日本産トンボ幼虫・成虫検索図説, 東海大出版, 2~7
- 岩崎洋樹・須田大祐・渡辺 守(2009): 里山林内のギャップで生活するノシメトンボ *Sympetrum infuscatum* (Selys) (トンボ目: トンボ科) の採餌活動, 日本応用動物昆虫学会誌, 53, 4, 165-171
- 岩淵成紀・呉知正行・稲葉光國(2001): 水鳥とイネと人が共生する冬期湛水水田の多面的利用法, 農業技術大系, 追録第 23 号, 8 巻
- 上田哲行(1976): クロイトトンボ繁殖個体群 I. 一日の移動と空間構造, 生理生態, 17, 303-312
- 上田哲行(1985): クロイトトンボの繁殖個体群 II. 繁殖場所での交尾可能雌の空間分布, 日本生態学会誌 35(3), 365-375
- 上田哲行(1987): クロイトトンボの実効性比とそれに関わる要因について, 石川県農業短期大学研究報告, 17, 41-50
- 上田哲行(1988): 水田のトンボ群集, 水辺環境の保全—生物群集の視点から— (江崎保男・田中哲夫編), 朝倉書店, 93-110
- 上田哲行(2008): アキアカネの減少傾向と減少時期—会員へのアンケート結果から—, SYMNET, 10, 2
- 大澤啓志・井上 剛・勝野武彦(2004): 都市域谷戸水田における冬季の管理条件が春季の水生生物に及ぼす影響について, ランドスケープ研究, 67, 4, 335-338
- 長田光世・森 清和・田畑貞寿(1993): トンボの種類からみた水辺緑地計画の指標に関する予備的考察, 造園雑誌, 56, 5, 151-156
- 長田光世・飯島 博・守山 弘(1997): 湿地緑地の植生構造とトンボの対応関係に関する基礎的研究, 造園雑誌, 60, 5, 547-552
- 長田光世(1995): トンボを指標とする水辺緑地計画, 沼田 真(編): 現代生態学とその周辺 (共著), 328—341, 東海大学出版会
- 長田光世・若杉晃介(1999): 農村環境における水辺緑地計画のためのトンボ類の生息場所に関する研究, 環境システム研究, 27, 701-706
- 裏戸秀幸・日置佳之・田中隆・長田光世(1996): ミティゲーションの基礎としてのチョウ・トンボ類の生息環境解析, 日本緑化工学会研究発表会要旨集, 27, 194-197
- 笠原岳洋(2006): 環境創造型稲作水田の水生生物生息場としての機能に関する研究, 宇都宮大学大学院農学研究科修士論文
- Taku Kadoya, Shin-Ichi Suda and Izumi Washitani (2009) Dragonfly crisis in Japan: a likely consequence of recent agricultural habitat degradation. *Biological Conservation* 142:1899-1905.
- 木村綾子・中越信和(1999): 水田において農法が農業生態系構成種の動態に及ぼす影響, 第 13 回環境情報科学論文集, 181-186
- 桐谷圭治(1998): 総合的有害生物管理 (IPM) から総合的生物多様性管理 (IBM) へ, 研究ジャーナル, 21(12), 33-37
- 小林 尚・野口義弘・日和田太郎・金山嘉久正・丸岡範夫 (1973) 水田の節足動物相ならびにこれに及ぼす殺虫剤散布の影響: 第 1 報水田の節足動物相概観, 昆虫, 41 (3), 359-373
- 神宮宇 寛・田代 卓・佐藤照男・露崎 浩・近藤 正(2006): 作土層の攪拌を抑制した農法がアカネ属の生息状況に与える影響, 農業農村工学会論文集, 74 (1), 133-140
- 神宮宇 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およぼす影響, 農業農村工学会論文集, 77 (1), 35-41
- 鈴木正貴・水谷正一・後藤 章(2004): 小規模魚道による水田, 農業水路および河川の接続が魚類の生息に及ぼす効果の検証, 農業土木学会論文集, 72(6), 641-651
- 巢瀬 司 (1998): 初心者のための蝶のルート・センサス その 1, やどりが, 178, 26-28
- 高橋伸拓・水谷正一・後藤 章(2009): 設置環境の違いからみた井桁護岸の生息魚類に対する効果, 農業農村工学会論文集, 77(4), 345-353
- Takamura K (1993): Population changes among chironomid species related to secondary effects of pesticide application in rice fields, *Arch Hydrobiol*, 127, 205-225
- Takamura K, Yasuno M (1986): Effects of pesticide application on chironomid larvae and ostracods in rice fields, *Appl Entomol Zool*, 21, 370-376
- 田口正男(1997): トンボの里—アカトンボにみる谷戸の自然—, 信山社
- 田中 章(1995): 環境アセスメントにおけるミティゲーション制度, 人間と環境, 21(3), 154-159
- 田中 章(1998): 環境アセスメントにおけるミティゲーション規定の変遷, ランドスケープ研究, 6 1 (5), 763-768
- 田中 章(1998): 生態系評価システムとしての HEP, 環境アセスメント ここが変わる (島津康男編), 環境技術研究協会
- 田中 章(1999): 米国の代償ミティゲーション事例と日本におけるその可能性, ランドスケープ研究, 62(5), 581-586
- 田中 正(1983): アキアカネの秋の移動, インセクト, 34 (2)
- 田中 正(1985): アキアカネの移動 (1984 年), インセクト, 36(1), 1-9
- 谷本 岳・若杉晃介・藤森新作(2003): 復田を想定した湛水管

理休耕田の植生管理技術, H15 農業工学関係成果情報, 49-50

津田孝夫(1969): モンテカルロ法とシミュレーション - 電子計算機の確率論的応用 -, 培風館, 34-35

(特) むさしの里山研究会, (特) 農と自然の研究所: 全国一斉赤トンボ調査報告書, 2003

農林水産省農業環境技術研究所 (1998): 水田生態系における生物多様性, 農業環境研究叢書, 第 10 号

農林水産省構造改善局計画部資源課監修 (2000): 土地改良事業計画設計基準 計画 ほ場整備 (水田), (社) 農業土木学会

農林水産省構造改善局監修 (2000): 土地改良事業計画設計基準 計画 暗きょ排水, (社) 農業土木学会

西内康浩・浅野和也(1978): 農薬製剤の数種淡水産動物に対する毒性 -XXXXXXII, 水産増殖, 26, 1, 26-30

長谷川雅美(1992): 両生類・爬虫類に関する自然環境への環境予測に係る基礎調査 (3), 開発地域等における自然環境への環境予測に係る基礎調査, 58-66

長谷川雅美(1995): 谷津田の自然とアカガエル, 生物・地球環境の科学 - 南関東の自然史 - (大澤雅彦・大原隆編), 105-112

馬場金太郎(1986): 佐渡島のアキアカネの移動に関する個体標識調査, 越佐昆虫同好会会報, 86

日鷹一雅・那波邦彦(1992): 水田生態系における攪乱的働きかけの生物群集の動態に対する影響, 個体群生態学会会報, 49, 88-96

日鷹一雅(1998): 水田における生物多様性とその修復, 水辺環境の保全: 生物群集の視点から (江崎保男・田中哲夫編), 朝倉書店, 123-151

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 (<特集> 低湿地生態系の保護: 中池見湿地を中心に), 日本生態学会誌, 48(2), 167-178

日鷹一雅(2000): 自然と結ぶ一農に見る多様性 (田中耕司編), 昭和堂, 193-221

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, 1, 20-25

兵庫県但馬県民局地域振興部豊岡農業改良普及センター (2006): おいしく安全なお米と生きものを同時に育む コウノトリ育む農法 <コシヒカリ編>

藤咲雅明(2000): 小河川・農業用水路・水田系における魚類の生息とその環境条件に関する研究, 平成 11 年度東京農工大学連合農学研究科博士学位論文

星野義延(1995): 植生調査に用いられる被度と優占度の階級, 群落研究, 11, 15-22

水田國康(1982): シオカラトンボ属のなわばり, インセクトリウム, 8, 19, 14-23

水谷正一・南 雄策・船川はるか(2010): HEP による環境価値の評価に基づいた順応的管理, 農業農村工学会誌, 699, 117-120

嶺田拓也・小出水規行・石田憲治(2009): 水田における冬期湛水の導入による持続的な多面的機能の発揮, 農村計画学会誌, 27, 335-340

守山拓弥・藤咲雅明・水谷正一・後藤 章 (2008): 農業用の

小河川, 農業水路および河川間に形成された水域ネットワークにおけるウグイの移動 -- 栃木県西鬼怒川地区における事例, 農業農村工学会論文集, 76(2), 85-94

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

守山 弘・飯島 博・原田直国(1990): トンボの移動距離をとおしてみた湿地生態系のありかた, 人間と環境, 15, 3, 2-15

山本哲央・新村捷介・宮崎俊行・西浦伸明(2009): 近畿のトンボ図鑑, いかだ社

Lik Saccheri・Mikko Kuussaari・Maaria Kankare・Pia Vikman・Wilhelm Fortelius・Likka Hanski (1999): Inbreeding and extinction in a butterfly metapopulation, *Nature*, 392, 491-493

若杉晃介・長田光世・水谷正一・福村一成(2003): アジアイトンボの移動距離の測定 - 水田ほ場整備地区における生物保全地の設置間隔に関連して -, 農業土木学会論文集, 219, 127-132

若杉晃介・水谷正一・福村一成(2003): コンピューターシミュレーションによるトンボの移動距離の推定法の開発, 農業土木学会論文集, 219, 143-144

若杉晃介・藤森新作(2005): 水田の乾田化がトンボの生息環境に与える影響とその対策, 農業土木学会誌, 646, 3-6

若杉晃介・嶺田拓也・石田憲治(2011): 冬期湛水水田によるトンボ保全効果, 農業農村工学会論文集, 271, 43-44

若杉晃介(2007): 水田水域に生息するトンボ類の生態, 農村の生きものを大切にする水田生態工学 (水谷正一編著), (社) 農山漁村文化協会, 75-84

若杉晃介(2006): 農村に棲む生物を保全する圃場デザイン, 農業技術大系作物編・追録 28 号, (社) 農山漁村文化協会, 技 928・8-13

鷺谷いづみ・矢原徹一(1997): 保全生態学入門 遺伝子から景観まで, 129-144

鷺谷いづみ(2007): コウノトリの贈り物, 地人書館

Fundamental Research on the Conservation and Mitigation Measures for Stagnant Water Dragonflies in Consolidated Paddy Fields

WAKASUGI Kousuke

Summary

Paddy field land consolidation projects, which started in 1963 in Japan, have made significant contributions, such as promoting rural areas, solving postwar food shortages, and improving agricultural productivity. In the last several decades, however, there has been a decline in wildlife species adapted to the secondary natural areas inherent in rural landscapes. This decline has resulted from changes in farming methods and the use of large quantities of agricultural chemicals, mechanization of farm work using tractors and combine harvesters, and paddy field land consolidation projects undertaken to improve agricultural output and productivity. In response to this decline, a 2001 amendment of the Land Improvement Act provided that the impact on the environment should be taken into consideration when undertaking these projects. From the viewpoint of maintaining biodiversity, however, the measures undertaken so far have been inadequate.

In this thesis, I describe achievements made in mitigation systems in some public work projects in Japan and abroad and examine their applicability to paddy field land consolidation projects. Mitigation, which was first emphasized in American environmental assessments conducted in 1969, refers to acts that counteract the negative impact on ecosystems caused by development projects, including (1) avoidance, (2) minimization, and (3) compensation, listed in the order of priority. The aim of this basic research is to investigate how various mitigation measures during paddy field land consolidation would affect dragonflies, which serve as representatives of wildlife in rural areas.

For example, acts falling under “avoidance” would involve conserving particularly important habitats (hot spots) when consolidating land. “Minimization” would involve carrying out consolidation in stages and maintaining habitat networks while taking into account metapopulations. As for “compensation” acts, I propose using fallow fields and other sites to establish biotopes, build thriving habitat networks, and implement ecological farming practices. In order to balance the conservation of dragonflies that inhabit stagnant water with farming, I propose an improved version of inundating paddy fields in winter based on chemical-free, zero-tillage cultivation, which combines existing farming techniques with knowledge of the life cycle of dragonflies, the drought resistance of larvae, and other important species traits. In this research, I studied the impact of paddy field land consolidation projects on the habitat quality of dragonflies and proposed countermeasures based on field measurements of drought resistance of larvae and the potential traveling range of adult dragonflies. These basic data can be used to devise sound mitigation practices and improve the quality of conservation measures for dragonflies.

keywords: dragonflies, mitigation, consolidated paddy fields, habitat networks, paddy field aridification