冬期湛水が水田の原生生物現存量に及ぼす影響

Influence of Winter Flooded Rice Paddies for Protistan Biomass

林紀男¹、稲森隆平²、岩渕成紀³

¹千葉県立中央博物館／〒260-8682 千葉市中央区青葉町955-2

²福島大学共生システム理工学類／〒960-1296 福島県福島市金谷川1番地

³特定非営利活動法人田んぼ／〒989-4302 宮城県大崎市田尻大貫字荒屋敷29番地1

NORIO HAYASHI¹, RYUHEI INAMORI², and SHIGEKI IWABUCHI³

¹Natural History Museum and Inst., Chiba/955-2 Aoba-cho, Chuo-ku, Chiba 260-8682, Japan

²Fukushima Univ., Faculty of Symbiotic System Sci./1 Kanayagawa, Fukushima 960-1296, Japan

³Rice Paddies Japan/29-1 Arayashiki, Tajiri-oonuki, Osaki, Miyagi 989-4302, Japan

Abstract

Protistan densities were compared in winter flooded and conventional rice paddies. There were significant differences about protistan and cyanobacterial densities in the rice paddies. The mean densities of planktonic microorganisms such as protist and cyanobacteria in winter flooded and conventional rice paddies were 36,700 cells/ml and 13,800 cells/ml respectively. We clarified the densities of microorganisms in the effluent water from rice paddies in May. There were also significant differences about protistan and cyanobacterial densities in the rice paddies. The mean densities of protist and cyanobacteria in winter flooded and conventional rice paddies were 49,000 cells/ml and 18,000 cells/ml respectively. Abundant protistan densities containing in effluent from rice paddy will promote plenty of aquatic animals such as tadpoles, frogs, larva of dragonfly, salamanders, loaches, and so forth. The differences of biodiversities and total biomass appearing in rice paddies were caused by planktonic microorganisms that support bottom of the ecological pyramid in rice paddies.

Key words: protist, winter flooded rice paddy, biomass, ecological pyramid

はじめに

水田は、里山の貴重な水辺環境として重要な位置を占めており、近年その重要性が大きく注目されている¹⁾。水田では稲の耕作に向けた水管理がなされており、秋の収穫期から春先の田起こし後までの非灌漑期には長期にわたり落水され乾燥状態が続く。こうした生態的攪乱をともしなう特殊な水環境²⁾が水田の特徴である。近年は、溜池や谷津の絞り水に頼った田越し灌漑体系は廃れ、圃場整備事業による大規模な暗渠灌漑体系が構築されている³⁾。収穫には大型農機の利用を容易にするため暗渠排水体系が整備され、排水弁の操作により速やかに水田表土

を乾燥状態に移行できる。こうした農地改変は、湿田で非灌漑期にも湿地状態が続いていた谷津奥の小区画の水田にまで及び、水田と畑地を年によって切り替えるような運用をも可能せしめている。

このような水田の乾田化は、永年にわたる水田耕作の周期に生活史を同調させ繁栄してきた数多くの水生生物個体群にも大きな影響を及ぼし³⁾、里山景観をも変化させている⁴⁾。近年、注目を集めている有機栽培、冬期湛水、不耕起栽培などさまざまな取り組みも水田を生活の場とする水生生物群に大きく影響を及ぼしていることが明らかにされつつある^{5,6)}。

こうした背景のもと、さまざまな条件の水田において

食物網の底辺を担う原生生物に着目し、その網羅的な出現種リスト化が試みられている⁷⁾。ここでは、冬期湛水と慣行水管理の両水田の田面水に出現する原生生物類の出現個体密度の季節変遷を比較検討し、これら原生生物の水田での出現個体密度に及ぼす水管理方法の影響を明らかにすることを目的とした。

調査方法

千葉県が「印旛沼水質改善技術検討会」のもとで実施している冬期湛水水田（ふゆみずたんぼ）を調査の中心とした。これは、千葉県佐倉市萩山新田（北緯35度45分18秒、東経140度13分34秒）において、隣接する2区画の水田（100×90m×2区）を冬期湛水と慣行水管理に分け、同一耕作者により水管理以外を共通にして両者を比較検討する事業である。同地での調査に加え、千葉県印旛郡栄町四ツ谷（北緯35度50分52秒、東経140度13分13秒）、宮城県大崎市田尻北小塩（北緯38度36分17秒、東経141度4分49秒）、秋田県南秋田郡大潟村大潟（北緯39度59分32秒、東経139度57分56秒）、福島県郡山市逢瀬町多田野（北緯37度24分7秒、東経140度16分7秒）など全国の冬期湛水水田において同様の調査を実施し比較検討した。

調査期間は、千葉県佐倉市萩山新田において冬期湛水を開始する以前の調査対象区画比較調査を実施した2005年6月から2008年12月までのおよそ3年半とした。同期間の千葉県佐倉市萩山新田における調査頻度は、湛水・落水前後は1日1回、その他は2-7日に1回とし、総調査回数は470回（2008年12月29日時点）を数えた。千葉県印旛郡栄町四ツ谷では毎週1回、その他の調査地点では毎月1回の調査を実施した。

水田での採集地点は、水田区画内で無作為に選定した4カ所以上の複数箇所の田面水とした。水深の浅い田面水用に自製した平形の柄杓により採水した試料各地点それぞれ約1リットルを、生物顕微鏡を用いて検鏡・同定し分類群別の出現密度を記録した。検鏡に際しては、採水試料をよく混和した後、試料0.2mlを採取し界線入りスライドガラス上で走査し、計数に供した。この計数作業は各試料5回繰り返して、得られた結果をQ testを用いてはずれ値検定した後、計数値を算定した。なお、群体を形成する種については、同時に混和試料1mlを枠付き界線入りスライドガラスに採取し、細胞数の計数誤差が少なくなるよう配慮した。なお、大きな群体を形成する種では採水試料4～8リットルをプランクトンネット（NXXX25規格）を用いて約100mlに濃縮（40～80倍）し

た試料も併用して検鏡し、両データの分散を検定して、ネット濃縮により得られた値が有意に高い場合にはネット濃縮試料のデータを採用し、ネット濃縮により得られた値が有意に低い場合にはネット濃縮試料のデータを破棄して直接計数により得られた値を採用した。これは、プランクトンネットの編目が40μmであるため、これより小さな細胞がネットに捕捉されず通過してしまうことに起因した細胞数過小評価、および大型群体ではネット使用により採水量を確保して誤差を少なくすることを目的としたためである。ただし、水田区画の異なる4地点以上から採取した試料により得られた計数値は、著しく異なる値となっても単純に算術平均して同地の計数値とした。これは、田面では風による吹き寄せおよび水口から水尻への田面内の水の流れなどに起因した浮遊微生物の偏りが生じることを前提としたためである。試料は、ホルマリンやアルコールなどの化学物質による固定は細胞の変形などを生じ同定に支障をきたすため、無固定で検鏡した。また、珪藻については、パイプユニッシュ処理⁸⁾を用いて細胞内容物を除去し殻の模様配列が判別しやすいようにした。なお、対象種は、原生生物界を中心としたが、同時に採集・観察される藍藻類も包含した。採集した試料は、水野・高橋⁹⁾、小島ほか¹⁰⁾、田中¹¹⁾などに基づき同定した。

結果および考察

2005年秋期から2008年冬期までの約3年にわたり、冬期湛水水田および慣行水管理水田において原生生物等の現存量の季節変動を追跡調査した。なお、藍藻類は分類の上では原生生物とは全く異なる細菌の仲間であるが、ここでは微細藻類として緑藻や珪藻と同様に観察されるため、分類群は異なるものの原生生物と同様に同定計数し、総細胞数を包含し検討した。

図1は、千葉県佐倉市萩山新田における原生生物類の単位田面水あたりの原生生物および藍藻類の出現細胞密度の季節変動をまとめたものである。調査年の差違により、湛水開始時期が異なるため、グラフの立ち上がり時期が前後しているが、単位田面水あたりの細胞数の季節変化は毎年類似していることが明らかとなった。また、冬期湛水水田および慣行水管理水田において確認される原生生物および藍藻類の出現細胞密度の範囲は、湛水期間を通じて田面水中の細胞数は1mlあたり1,000から100,000細胞の範囲で増減を繰り返すことは両者で共通であることが明らかとなった。ただし、3カ年の湛水期間

における単位田面水あたりの細胞数を、冬期湛水水田および慣行水管理水田と比較すると、冬期湛水水田では1 mlあたり36,700 (SE: 2,600) 細胞、慣行水管理水田では1 mlあたり13,800 (SE: 2,900) 細胞であり、冬期湛水では慣行水管理に比較して年間平均で約2.7倍の細胞密度を示すことが明らかとなった。

図2は、冬期湛水水田および慣行水管理水田における湛水開始直後の原生生物および藍藻類の出現細胞密度の経時変化を比較したものである。冬期湛水では秋期、慣

行水管理では春期という季節の差はあるが、冬期湛水水田では湛水開始直後に速やかに原生生物類の密度が高まるのに比較して、慣行水管理水田では、密度の高まりが緩やかに進行することがグラフの傾きから読み取れる。湛水開始40日を経たの最大個体密度はほぼ同一となるものの、湛水開始から40日間の個体密度推移は大きく異なることが明らかである。原生生物をはじめとする水生微生物では、休眠胞子や休眠卵の状態乾燥に適応し、再び水を得るまで休眠状態となること¹⁵⁾が知られている。ま

Fig. 1 Seasonal changes on density of protista in winter flooded and conventional rice paddies. Symbols: ●, Winter flooded ; ○, Conventional.

Fig. 2 initial transitions of protistan densities in winter flooded and conventional rice paddies. Symbols: ●, Winter flooded ; ○, Conventional.

た、休眠状態から覚醒して再び増殖をはじめるにあたって、休眠状態から一斉には増殖を開始しない個体群保持の仕組みが備わっていることが知られている¹²⁾。これは、乾燥状態後に遭遇した湛水状態が安定的なものなのか、一時的なもので短時間の内に再び乾燥状態となってしまうものなのか予測できないため、休眠胞子の一定割合部分のみが増殖をはじめ、一定割合部分では念のため休眠を続けるという巧みな個体群維持の戦略であるとされる。慣行水管理の水田では、水の無い冬期に一時的な降雨などで水を得ても再び乾燥してしまう状況を何度も経験し、先の個体群維持戦略にのっとり用心深く休眠胞子が少しずつ増殖を開始していると考えられる。一方、毎年繰り返し冬期湛水が実施される水田では、湛水により水を得ることにより休眠状態が乾燥に耐えている原生生物等の多くが速やかに増殖を始める傾向が確認された。これは、同水田に生育する原生生物個体群が、冬期に得られる湛水が安定的であることを経験的に学び適応変化させたものと類推される。同種であっても生育地の環境条件に適応した適応変化が認められる事実は、甲殻類のミジンコやワムシなどでも報告¹³⁾されており、本研究にて明らかにされた湛水直後の増殖特性の差違は、原生生物類での適応変化によるものと考えられる。実際に調査地の中で10年以上冬期湛水を実施している千葉県栄町四ツ谷および数年実施してきた秋田県大湯村では適応変化と考えられる現象が顕著であるが、冬期湛水の取り組みを開始したばかりの千葉県佐倉市萩山新田では同傾向が弱いことが確認されており、これらの事実は先の推論と整合的である。

冬期湛水水田と慣行水管理水田において出現した原生生物類の種構成を比較した。表1は、本調査において同定された出現種目録である。冬期湛水水田では、本目録の全種391種（藍藻類82種、原生生物309種（緑藻類71種、アオサ藻類2種、車軸藻類6種、珪藻類39種、アメーバ類32種、鞭毛虫類56種、絨毛虫類103種））が確認され、慣行水管理水田では、目録において種名前に*（アスタリスク）で印を付けた13種を除外した378種（藍藻類82種、原生生物296種（緑藻類70種、アオサ藻類2種、車軸藻類5種、珪藻類39種、アメーバ類29種、鞭毛虫類56種、絨毛虫類95種））が確認された。湛水初期には、肉質鞭毛虫門（Sarcomastigophora）鞭毛虫亜門（Mastigophora）植物性鞭毛虫綱（Phytomastigophorea）オオヒゲマワリ目（Volvocida）の*Pandorina* sp., *Pleodorina* sp., *Eudorina* sp.などの鞭毛虫類、および肉質鞭毛虫門（Sarcomastigophora）肉質虫亜門（Sarcodina）根足虫上綱（Rhizopoda）

葉状根足虫綱（Lobosea）アメーバ目（Amoebida）の*Polychaos dubium*, *Amoeba proteus*などのアメーバ類が優占化し、次いで絨毛虫門（Ciliophora）異毛綱（Heterotrichea）異毛亜綱（Heterotrichia）ラッパムシ目（Heterotrichida）の*Stentor coerules*、同じく旋毛綱（Spirotrichea）少毛亜綱（Oligotrichia）少毛目（Oligotrichida）の*Halteria grandinella*に代表される絨毛虫類が増えることが確認され、この種構成の変遷は湛水時期（季節）が異なる冬期湛水水田と慣行水管理水田で顕著な差違は認められなかった。一方、湛水時期にかかわらず水温が高まる春になって共通して見られる種としては、肉質鞭毛虫門（Sarcomastigophora）鞭毛虫亜門（Mastigophora）植物性鞭毛虫綱（Phytomastigophorea）ミドリムシ目（Euglenida）の*Phacus pleuronectes*および*Euglena viridis*、不等毛植物門（Heterokontophyta）珪藻植物綱（Bacillariophyceae）羽状珪藻亜綱（Pennatophycidae）フナガタケイソウ目（Naviculales）クチビルケイソウ科（Cymbellaceae）の*Cymbella* spp.、同じくフナガタケイソウ科（Naviculaceae）の*Navicula* spp.などの珪藻類が挙げられる。水田に出現する原生生物類は、隣接する水田でも全く異なる種構成となることが多いため普遍的な種構成を見いだすことは困難であったが、これは既往の知見¹⁴⁻¹⁷⁾と整合的である。これは、水田における施肥の種類と量、農業使用の種類と量、湛水深、田起こしや代かきの深さなど、さまざまな環境要因により影響を受けることに起因するものであると考えられる。これまでに水田に見いだされる原生生物等として藍藻類129種、原生生物427種（緑藻類103種、アオサ藻類2種、車軸藻類6種、珪藻類44種、アメーバ類36種、鞭毛虫類70種、絨毛虫類166種）の合計556種が報告⁷⁾されている。また同様に水田に出現するワムシ類、ミジンコ類、水生ミズミズ類などの調査も行われ、輪形動物127種、腹毛動物1種、線形動物6種、節足動物109種、環形動物15種、緩歩動物1種の合計259種が目録化¹⁸⁾されている。その他にも昆虫、両生類、魚類、鳥類など多様な生物群について水田を生育の場とする生きものを網羅的に把握する試み¹⁹⁾がなされている。これまでに田面水のプランクトン群集の種組成、季節的変遷、施肥の影響などに関するさまざまな検討¹⁴⁻¹⁷⁾がなされ、元肥の投入量がプランクトン現存量に大きく影響を及ぼすこと²⁰⁻²²⁾、地域特性や耕作法などにより出現種が質量ともに大きく影響を受けること¹¹⁻¹⁷⁾が明らかにされている。

図3は、調査対象とした各地域の冬期湛水水田と慣行水管理水田において観察された原生生物および藍藻類の

Table 1 List of protistan and cyanobacterial species appearing in rice paddy fields.

Monera	<i>Cylindrospermum</i>	<i>Pediastrum</i>	<i>margaritifera</i>
Cyanophyta	<i>raciborskii</i>	<i>duplexgracillimum</i>	<i>Arthrodesmus curvatus</i>
Cyanophyceae	<i>Anabaenopsis arnoldii</i>	<i>Hydrodictyon reticulatum</i>	<i>Euastrum germanicum</i>
Chroococcales	<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	<i>Coelastrum sphaericum</i>	<i>Staurostrum dickiei</i>
<i>Synechocystis</i> sp.	<i>Nodularia spumigena</i>	<i>Coelastrum cambricum</i>	<i>Desmidium swartzii</i>
<i>Synechococcus</i> sp.	<i>Aulosira prolifica</i>	<i>Tetrastrum heteracanthum</i>	Sphaeropleales
<i>Dactylococcopsis</i>	<i>Anabaena affinis</i>	<i>Tetrastrum</i>	<i>Schroederia</i> sp.
<i>raphidioides</i>	<i>Anabaena</i>	<i>staurogeniaeforme</i>	Ulvophyceae
<i>Rhabdoderma lineare</i>	<i>aphanizomenoides</i>	<i>Tetrallantos lagerheimii</i>	Ulrichiales
<i>Microcystis aeruginosa</i>	<i>Anabaena macrospora</i>	<i>Actinastrum hantzschii</i>	<i>Ulothrix</i> sp.
<i>Microcystis firma</i>	<i>Anabaena planktonica</i>	<i>Actinastrum</i>	Siphonocladales
<i>Microcystis ichtyoblabe</i>	<i>Anabaena smithii</i>	<i>hantzschii</i> fluviale	<i>Cladophora crispata</i>
<i>Microcystis novacekii</i>	<i>Anabaena tenericaulis</i>	<i>Scenedesmus quadricauda</i>	Charophyceae
<i>Microcystis viridis</i>	<i>Anabaena viguieri</i>	<i>Scenedesmus acuminatus</i>	Coleochaetales
<i>Microcystis wesenbergii</i>	<i>Anabaena lemmermannii</i>	<i>Scenedesmus bernardii</i>	<i>Chaetosphaeridium</i> sp.
<i>Aphanocapsa rivularis</i>	<i>Anabaena mucosa</i>	<i>Scenedesmus</i>	Charales
<i>Aphanocapsa pulchra</i>	<i>Anabaena pseudocompacta</i>	<i>acuminatustortuosus</i>	<i>Chara braunii</i>
<i>Aphanocapsa rivularis</i>	<i>Anabaena reniformis</i>	<i>Scenedesmus actus</i>	<i>Chara globularis</i>
<i>Aphanocapsa bififormis</i>	<i>Anabaena spiroides</i>	<i>Scenedesmus subspicatus</i>	<i>Chara zeylanica</i>
<i>Aphanothece stagnina</i>	<i>Anabaenopsis arnoldii</i>	<i>Scenedesmus abundans</i>	<i>Nitella flexilis</i>
<i>Aphanothece nidulans</i>	<i>Anabaenopsis circularis</i>	<i>Scenedesmus granulatus</i>	<i>*Nitella hyalina</i>
<i>Aphanothece pallida</i>	<i>Nostoc sphaericum</i>	<i>Scenedesmus longus</i>	
<i>Chroococcus turgidus</i>	<i>Spirulina major</i>	Oedogoniales	Heterokontophyta
<i>Chroococcus minutus</i>	<i>Arthrospira maxima</i>	<i>Oedogonium varians</i>	Bacillariophyceae
<i>Chroococcus minor</i>	<i>Planktothrix agardhii</i>	<i>Oedogonium crispum</i>	Centrophycidae
<i>Chroococcus</i>	<i>Planktothrix mougeotii</i>	<i>Oedogonium</i>	Coscinodiscales
<i>limneticus</i> elegans	<i>Oscillatoria tenuis</i>	<i>franklinianum</i>	<i>Cyclotella</i> sp.
<i>Gloeotheca confluens</i>	<i>Oscillatoria splendida</i>	<i>Bulbochaete</i> sp.	<i>Stephanodiscus</i> sp.
<i>Merismopedia</i>	<i>Trichodesmium</i>	Zygnematales	Coscinodiscales
<i>tenuissimum</i>	<i>ivanoffiana</i>	<i>Zygnema quadrangulatum</i>	<i>Melosira varians</i>
<i>Merismopedia punctatum</i>	<i>Phormidium foveolatum</i>	<i>Zygnema synadelphum</i>	<i>Aulacoseira italica</i>
<i>Coelosphaerium</i>	<i>Phormidium mucicola</i>	<i>Zygnema subcruciatum</i>	<i>Aulacoseira distans</i>
<i>kuetzingianum</i>	<i>Phormidium uncinatum</i>	<i>Zygnema fanicum</i>	<i>Aulacoseira granulata</i>
<i>Woronichinia naegeliana</i>	<i>Phormidium autumnale</i>	<i>Zygnemopsis quadrata</i>	Pennatophycidae
<i>Gomphosphaeria lacustris</i>	<i>Phormidium tenue</i>	<i>Spirogyra varians</i>	Diatomales
<i>Gomphosphaeria aponica</i>	<i>Lyngbya lagerheimii</i>	<i>Spirogyra variformis</i>	<i>Tabellaria flocculosa</i>
Chamaesiphonales	<i>Lyngbya contorta</i>	<i>Spirogyra bififormis</i>	<i>Diatoma vulgaris</i>
<i>Chamaesiphon clavatus</i>	Stigonematales	<i>Spirogyra nitida</i>	<i>Synedra ulna</i>
<i>Chamaesiphon</i>	<i>Stigonema ocellatum</i>	<i>Spirogyra semiornata</i>	<i>Synedra acus</i>
<i>confervicola</i>		<i>Spirogyra weberi</i>	<i>Synedra rumpens</i>
<i>Chamaesiphon minutus</i>	Protoctista	<i>Spirogyra spreeiana</i>	<i>Astrionella formosa</i>
Pleurocapsales	Chlorophyta	<i>Mougeotiella</i> sp.	<i>Hannaea arcus</i>
<i>Entophysalis lemaniae</i>	Chlorophyceae	<i>Mougeotia</i> sp.	<i>Fragilaria crotonensis</i>
<i>Myxosarcina</i>	Chlorococcales	<i>Gonatozygon kinahani</i>	<i>Fragilaria pinnata</i>
<i>chroococcoides</i>	<i>Chlorococcus</i> sp.	<i>Gonatozygon pilosum</i>	Achnanthales
<i>Pleurocapsa fluvialis</i>	<i>Planktosphaeria</i> sp.	<i>Spirotaenia condensata</i>	<i>Achnanthes</i>
Nostocales	<i>Golenkinia radiata</i>	<i>Penium spirostriolatum</i>	<i>exigua</i> heterovalvata
<i>Homoeothrix juliana</i>	<i>Micractinium</i>	<i>Penium exiguum</i>	<i>Achnanthes hungarica</i>
<i>Calothrix fusca</i>	<i>pusillum</i> elegans	<i>Penium</i>	<i>Achnanthes lanceolata</i>
<i>Calothrix parietina</i>	<i>Dictyosphaerium</i>	<i>exiguum</i> glaberrimum	<i>Cocconeis placentula</i>
<i>Dichothrix gypsophila</i>	<i>pulchellum</i>	<i>Closterium libellula</i>	Naviculales
<i>Gloeotrichia pisum</i>	<i>Tetraedron regulare</i>	<i>Closterium aciculare</i>	<i>Neidium iridis</i>
<i>Gloeotrichia natans</i>	<i>Tetraedron tumidulum</i>	<i>Closterium gracile</i>	<i>Neidium affine</i>
<i>Gloeotrichia echinulata</i>	<i>Tetraedron hastatum</i>	<i>Closterium wallichii</i>	<i>Navicula cuspidata</i>
<i>Isactis nipponica</i>	<i>Treubaria setigera</i>	<i>Pleurotaenium trabecula</i>	<i>Navicula radiosa</i>
<i>Rivularia beccariana</i>	<i>Oocystis borgei</i>	<i>Tetmemorus brebissonii</i>	<i>Navicula rhynchocephala</i>
<i>Tolypothrix tenuis</i>	<i>Chodatella subsalsa</i>	<i>Cosmarium turgidum</i>	<i>Navicula exigua</i>
<i>Scytonema crispum</i>	<i>Ankistrodesmus gracilis</i>	<i>Cosmarium obtusatum</i>	<i>Navicula angusta</i>
<i>Hydrocoryne spongiosa</i>	<i>Chlorella vulgaris</i>	<i>Cosmarium pachydermum</i>	<i>Pinnularia gibba</i>
<i>Microchaete tenera</i>	<i>Pediastrum simplex</i>	<i>Cosmarium</i>	<i>Caloneis bacillaris</i>

<i>Stauroneis phoenicenteron</i>	<i>Rabdiophrys</i> sp.	<i>Pandorina</i> sp.	<i>Hausmanniella</i> sp.
<i>Pleurosigma</i> sp.	Mastigophora	<i>Eudorina</i> sp.	Bursariomorphida
<i>Gomphonema acuminatum</i>	Zoomastigophora	<i>Volvox</i> sp.	* <i>Bursaria</i> sp.
<i>Cymbella tumida</i>	Cercomonadida	<i>Pleodorina</i> sp.	<i>Bursaridium</i> sp.
<i>Cymbella minuta</i>	<i>Cercomonas</i> sp.	<i>Gonium</i> sp.	Phyllopharyngea
<i>Eunotia arcus</i>	Kinetoplastida		Phyllopharyngia
<i>Nitzschia palea</i>	<i>Bodosp.</i>	Ciliophora	Cyrtophorida
<i>Nitzschia recta</i>	<i>Pleuromonas</i> sp.	Karyorelictea	<i>Hypocoma</i> sp.
<i>Bacillaria paradoxa</i>	<i>Cephalothamnium</i> sp.	Protostomatia	<i>Chitonella</i> sp.
<i>Hantzschia amphioxys</i>	Phytomastigophorea	Protostomatida	<i>Chlamydon</i> sp.
<i>Surirella elegans</i>	Cryptomonadida	<i>Trachelonema</i> sp.	<i>Cyrtophoron</i> sp.
	<i>Cryptomonas</i> sp.	<i>Tracheloraphis</i> sp.	<i>Trithigmostoma</i> sp.
	<i>Chroomonas</i> sp.	<i>Trachelocerca</i> sp.	<i>Chilodonella</i> sp.
	<i>Chilomonas</i> sp.	Heterotrichea	<i>Hartmannula</i> sp.
	<i>Pyrenomonas</i> sp.	Heterotrichia	Suctorioria
	<i>Cyathomonas</i> sp.	Heterotrichida	Exogenida
	Dinoflagellida	<i>Stentor coeruleus</i>	<i>Podophrya</i> sp.
<i>Amoeba proteus</i>	<i>Amphisolenia</i> sp.	<i>Stentor polymorphus</i>	Endogenida
<i>Polychaos dubium</i>	<i>Gymnodinium</i> sp.	<i>Stentor igneus</i>	<i>Acinetas</i> sp.
<i>Chaos carolinense</i>	<i>Ceratium</i> sp.	<i>Blepharisma japonicum</i>	<i>Tokophrya</i> sp.
<i>Saccamoeba</i> sp.	<i>Peridinium</i> sp.	<i>Blepharisma americanum</i>	Nassophorea
<i>Thecamoeba</i> sp.	Euglenida	<i>Spirostomum ambiguum</i>	Nassophoria
<i>Discamoeba</i> sp.	<i>Eutreptia</i> sp.	<i>Spirostomum teres</i>	Synhymeniida
<i>Vannella</i> sp.	<i>Euglena gracilis</i>	<i>Condylostoma</i> sp.	<i>Nassulopsis</i> sp.
<i>Mayorella</i> sp.	<i>Euglena viridis</i>	Heterotrichia	<i>Chilodontopsis</i> sp.
<i>Acanthamoeba</i> sp.	<i>Euglena acus</i>	Clevelandellida	<i>Scaphidiodon</i> sp.
Schizopyrenida	<i>Euglena gigas</i>	<i>Clevelandella</i> sp.	Nassulida
<i>Vahlkampfia</i> sp.	<i>Euglena pisciformis</i>	Spirotrichea	<i>Nassula</i> sp.
<i>Naegleria</i> sp.	<i>Euglena oxyuris</i>	Oligotrichia	Microthoracida
Arcellinida	<i>Euglena proxima</i>	Oligotrichida	<i>Microthorax</i> sp.
<i>Cochliopodium</i> sp.	<i>Euglena variabilis</i>	<i>Halteria grandinella</i>	<i>Drepanomonas</i> sp.
<i>Arcella</i> sp.	<i>Euglena terricola</i>	<i>Tontonia</i> sp.	Propeniculida
<i>Diffugia</i> sp.	<i>Phacus pleuronectes</i>	<i>Strombidium</i> sp.	<i>Leptopharynx</i> sp.
<i>Centropyxis</i> sp.	<i>Phacus longicauda</i>	<i>Strombidinopsis</i> sp.	Oligohymenophorea
<i>Nebela</i> sp.	<i>Phacus helikoides</i>	<i>Strobilidium</i> sp.	Peniculia
Trichosida	<i>Phacus acuminatus</i>	Hypotrichia	Peniculida
<i>Trichosphaerium</i> sp.	<i>Trachelomonas armata</i>	Euplotida	<i>Frontonias</i> sp.
Filosea	<i>Trachelomonas robusta</i>	<i>Uronydia</i> sp.	<i>Urocentrum</i> sp.
Aconchulinida	<i>Trachelomonas allia</i>	<i>Aspidisca</i> sp.	<i>Paramecium caudatum</i>
<i>Vampyrella</i> sp.	<i>Trachelomonas cylindrica</i>	<i>Euplotes charon</i>	<i>Paramecium aurelia</i>
<i>Nuclearia</i> sp.	<i>Strombomonas</i> sp.	<i>Euplotes eurystomus</i>	* <i>Paramecium bursaria</i>
<i>Penardia</i> sp.	<i>Lepocinclis</i> sp.	<i>Euplotes woodruffi</i>	Hymenostomatia
Gromiida	<i>Colacium</i> sp.	<i>Euplotes affinis</i>	Hymenostomatida
* <i>Gromia</i> sp.	<i>Astasia</i> sp.	<i>Euplotes caudatus</i>	<i>Tetrahymena rostrata</i>
<i>Chlamydomorphys</i> sp.	<i>Rhabdomonas</i> sp.	Stichotrichia	<i>Tetrahymena pyriformis</i>
<i>Pseudodiffugia</i> sp.	<i>Menoidium</i> sp.	Stichotrichida	<i>Colpidium campylum</i>
<i>Euglypha</i> sp.	<i>Peranema</i> sp.	<i>Urostyla</i> sp.	<i>Glaucoma scintillans</i>
* <i>Trinema</i> sp.	<i>Urceolus</i> sp.	<i>Uroleptus</i> sp.	Scuticociliatida
Actinopoda	<i>Entosiphon</i> sp.	<i>Strongylidium</i> sp.	<i>Pseudocohnilembus</i> sp.
Heliozoa	Chrysomonadida	<i>Oxytricha</i> sp.	<i>Uronema</i> sp.
Actinophryida	<i>Monas</i> sp.	<i>Stylonychia</i> sp.	<i>Cyclidium</i> sp.
<i>Actinophrys</i> sp.	<i>Ochromonas</i> sp.	<i>Urosoma</i> sp.	Peritrichia
Desmothoracida	<i>Uroglena</i> sp.	Armophorida	Sessilida
* <i>Clathrulina</i> sp.	<i>Dinobryon</i> sp.	Armophorida	<i>Astylozoon</i> sp.
Ciliophryida	<i>Chromulina</i> sp.	<i>Palmarella</i> sp.	<i>Hastatella</i> sp.
<i>Ciliophrys</i> sp.	<i>Heterochromulina</i> sp.	* <i>Parametopus</i> sp.	<i>Ophrydium</i> sp.
Taxopodida	<i>Mallomonas</i> sp.	Odontostomatida	<i>Cothurnia</i> sp.
<i>Sticholonche</i> sp.	<i>Synura</i> sp.	Odontostomatida	<i>Thuricola</i> sp.
Centrohelida	Volvocida	<i>Discomorphella</i> sp.	<i>Vaginicola</i> sp.
<i>Acanthocystis</i> sp.	<i>Dunaliella</i> sp.	Colpodea	<i>Vorticella annulata</i>
<i>Raphidiocystis</i> sp.	<i>Chlamydomonas</i> sp.	Colpodida	<i>Vorticella campanula</i>
Rostospaerida	* <i>Chlorogonium</i> sp.	<i>Colpoda</i> sp.	<i>Vorticella convallaria</i>

<i>Vorticella costata</i>	<i>Opercularia</i> sp.	Prostomatida	* <i>Didinium</i> sp.
<i>Vorticella granulata</i>	<i>Rhabdostyla</i> sp.	<i>Holophrya</i> sp.	Pleurostomatida
<i>Vorticella microstoma</i>	<i>Campanella</i> sp.	Prorodontida	<i>Loxophyllum</i> sp.
<i>Vorticella quadrangularis</i>	<i>Epistylis hentscheli</i>	<i>Prorodon</i> sp.	* <i>Amphileptus</i> sp.
<i>Carchesium aselli</i>	<i>Epistylis cambari</i>	<i>Coleps hirtus</i>	* <i>Litonotus</i> sp.
<i>Carchesium epistylis</i>	<i>Epistylis lacustris</i>	Litostomatea	Pharyngophorida
<i>Carchesium gracilis</i>	Mobilida	Haptoria	* <i>Dileptus</i> sp.
<i>Carchesium polypinum</i>	<i>Trichodina</i> sp.	Haptorida	
<i>Zoothamnium</i> sp.	<i>Urceolaria</i> sp.	* <i>Lacrymaria</i> sp.	
<i>Intranstylum</i> sp.	Prostomatea	<i>Trachelophyllum</i> sp.

Fig. 3 Seasonal changes on density of protista in winter flooded and conventional rice paddies. Symbols: ●, Winter flooded ; ○, Conventional.

田面水中の細胞密度の季節変遷を模式的に示したものである。慣行水管理水田では、初夏に中干しにより水が落とされる期間があるため細胞密度のグラフが2つの山を描くことが特徴となる。この図は、単位田面水あたりに生育する細胞密度を図示するが、同時に囲われた面の部分がそれぞれの水田において年間に保持される原生生物等の現存量の多寡を示唆している。この図から、細胞密度の積分値として面で図示される年間総現存量累積値を比較すると、慣行水管理水田に比較して冬期湛水水田において著しく高い値となることが明らかである。高頻度で調査を実施した千葉県佐倉市菰山新田および千葉県印旛郡栄町四ツ谷の2地区の3カ年を対象として、原生生物類の年間総現存量を比較すると、冬期湛水水田で 1.2×10^8 cells・day、慣行水管理水田で 1.1×10^7 cells・dayと有意差が確認 ($p = 0.009$) された。

本研究にて、冬期湛水と慣行水管理において出現が確認できた種数差は13種と全確認種数391種の約3%に留まった。これは、調査した各水田がそれぞれ同じ水源を使

用することに起因し、休眠孢子等の潜在的な供給能に差がないため、施肥や農薬使用などの要因に比較して水管理だけでは年間を通じた出現種数には大きな差が生じなかったためであると考えられる。しかしながら、調査毎に各調査水田区画にて確認できた種数を冬期湛水と慣行水管理とで比較すると冬期湛水（平均109種：SD = 19.9）において慣行水管理（平均68種：SD = 22.3）よりも有意に高いことが確認 (Unpaired t-test, $df = 725$, $p < 0.0001$) された。このことは、冬期湛水管理において田面水中に認められる藍藻類および原生生物類の種多様性が高いことを意味している。

図4は、5月期における各調査対象地での水田水尻からの流出水中の原生生物および藍藻類現存量を冬期湛水水田と慣行水管理水田と比較したものである。冬期湛水水田では、平均1 mlあたり49,000細胞 (SD = 11,400)、慣行水管理水田では平均1 mlあたり18,000細胞 (SD = 11,500) であり、慣行水管理水田からの流出水に比較して冬期湛水水田からの流出水に極めて高密度の原生生物

Fig. 4 Difference in density of protista in effluent water from winter flooded and conventional rice paddies

類が含まれていることが明らかとなった。近年、河川に魚道を設け、水路と水田を傾斜導壁型や千鳥X型などの小規模魚道で連絡して魚類の移動性に配慮し、田んぼ・水路・河川と連なる水系の連続性を確保する取り組みが各地で盛んに行われるようになってきた^{23, 24)}。川から水を伝って田に入る小魚は餌の豊富な水を嗅ぎ分け、慣行水管理水田を避け選択的に冬期湛水水田に遡上する。水田と灌漑水路を小規模魚道で連絡すると、水路に生育する魚類のうち、水田を産卵場所として活用しないタイリクバラタナゴを除外すると水路で確認された7種429個体の魚類の内、48時間で49%の個体が冬期湛水水田に遡上した観察報告²⁵⁾もなされている。これは、冬期湛水水田の水尻から流出水にドジョウなどの小型魚類の好適な餌となる動物プランクトンが高密度に包含されているため、冬期湛水水田と慣行水管理水田があれば選択的に前者に遡上することを示唆するもので先の考察を裏づける結果である。このように水田において種多様性が高まることは、稲食害生物の生育をも包含することになるが、一方で天敵生物の関与も期待できるため、食害生物の突出した異常増殖を抑制可能であり、農業に頼らない耕作を可能せしめるものとして大きな注目を集めている。

慣行農法と有機農法との水田において認められる生物相の構造・現存量の検討については、いくつかの報告²⁶⁻²⁷⁾があるものの、いまだ緒についた段階であり、冬期湛水と慣行水管理の比較⁶⁾、農業の影響²⁸⁾など、今後の研究課題が数多く残されているものと結論づけられる。

結論

冬期湛水水田と慣行水管理水田で原生物類および藍藻類の出現種数および現存量を3年にわたり比較した。その結果、調査期間を通じて出現した種総数は冬期湛水水田391種、慣行水管理378種と両者の差は限定的で同様の種が出現していることが明らかとなった。しかしながら、各調査毎の出現種数の分布を比較すると、冬期湛水（平均109種）において慣行水管理（平均68種）よりも有意に高いことが確認され、冬期湛水において原生物および藍藻類の種多様度が高いことが明らかとなった。

同様に、田面水中の原生物および藍藻類の現存量を比較した。その結果、両者ともに湛水期間を通じて田面水中の細胞数は1 mlあたり1,000から100,000細胞の範囲で増減を繰り返すことは共通ながら、湛水期間における各調査毎の単位田面水あたりの細胞数を比較すると、冬期湛水水田では1 mlあたり36,700細胞、慣行水管理水田では1 mlあたり13,800細胞と約2.7倍の差違が認められた。このことから、冬期湛水水田では、慣行水管理水田に比較して、原生物類および藍藻類の出現種多様度および現存量が共に高いことが明らかとなった。

5月期における水田水尻からの流出水に、含まれる原生物類および藍藻類の現存量を比較すると冬期湛水水田では平均1 mlあたり49,000細胞、慣行水管理水田では平均1 mlあたり18,000細胞であり、慣行水管理水田に比較して冬期湛水水田からの流出水に極めて高密度の原生物類および藍藻類が含まれることが明らかとなった。

水田生態系においてオタマジャクシや水生昆虫、小型

魚類などの食物源となる原生生物類が質・量ともに豊かな冬期湛水水田では、食物網を通じた高次捕食者の誘因効果が発揮されるものと推察される。水田生態系の生物相が豊富になることは、稲食害生物の出現をも包含するが、同時に食害生物の天敵生物の関与をも期待できるため、特定種の異常増殖を抑制する効果が期待できる。冬期湛水による水田生態系の安定性を高める試みは、農業使用量低減化の可能性を秘めていると考えられ、冬期湛水水管理の有用性の一面であると考えられる。

謝辞

三門増雄氏（千葉県佐倉市）、新海秀次氏（千葉県栄町）、鈴木要氏（宮城県大崎市）、中村和夫氏（福島県郡山市）、近藤正氏（秋田県大潟村）には、頻繁な生物相調査に特段のご配慮を賜った。ここに記して謝意を表する。

本調査は、千葉県が所管する「印旛沼水質改善技術検討会」のもとで実施されたものである。また、社団法人農村環境整備センターが所管する農林水産省 2006, 2007, 2008年度「多様な生産基盤活用技術開発事業」の一環として実施した調査結果を成果として盛り込んでまとめたものである。

引用文献

- 1) 椿 宜高：里山の重要性、*In*、京都大学総合博物館・京都大学生態学研究センター編、生物の多様性ってなんだろう？、211-225、京都大学学術出版会、京都（2007）
- 2) 水野寿彦：池沼の生態学、pp.187、築地書館、大阪（1971）
- 3) 守山弘：水田を守るとはどういうことか—生物相の視点から、pp.205、農山漁村文化協会、東京（1997）
- 4) 藤見俊夫・渡邊正英・浅野耕太：1996、耕作放棄や圃場整備による棚田景観劣化の経済損失、環境科学会誌、19(3)、195-207（1996）
- 5) 中村俊彦：特集・田んぼのエコロジー、遺伝、53(4)、12-60（1999）
- 6) 林 紀男：田んぼ生態系を底支えている原生生物、農林水産省 平成19年度 多様な生産基盤活用技術開発事業「命をつなぐ未来をつなぐ」農業農村整備と生物多様性、9-10、社団法人農村環境整備センター、東京（2008）
- 7) 林 紀男・岡野邦宏・稲森隆平：水田生態系に出現する原生生物、千葉県立中央博物館自然誌研究報告、10(2)、57-70（2009）
- 8) 南雲 保・出井雅彦・長田敬五：微小藻の世界 珪藻の世界 ミクロの宝石 観察と分類、pp.58、国立科学博物館、東京（2000）
- 9) 水野寿彦・高橋永治、1991、日本淡水動物プランクトン検索図説、pp.532、東海大学出版会、東京（1991）
- 10) 小島貞男・須藤隆一・千原光雄：環境微生物図鑑、pp.776、講談社サイエンティフィク、東京（1995）
- 11) 田中 正明：日本淡水産動物植物プランクトン図鑑、pp.584、名古屋大学出版会、名古屋（2002）
- 12) 稲森悠平：最新 環境浄化のための微生物学、講談社サイエンティフィク、東京（2008）
- 13) 花里孝幸：ミジンコ先生の水環境ゼミ 生態学から環境問題を視る、pp.268、地人書館、東京（2006）
- 14) Kikuchi E., C. Furusaka, Y. Kurihara: Surveys of the fauna and flora in the water and soil of paddy fields. Rep. Inst. Agr. Res. Tohoku Univ. 26, 25-35（1975）
- 15) 平 誠・宝月欣二：水田における施肥とプランクトン群集の種組成の関係、陸水学雑誌、48(2)、77-83（1987）
- 16) 藤田裕子・中原紘之：水田の田面水と土壌における藻類群集の季節変化、陸水学雑誌、60、67-76（1999）
- 17) Yamazaki M, Hamada Y, Kamimoto N, Momii T, Aiba Y, Yasuda N, Mizuno S, Yoshida S, and Kimura M.: Changes in the community structure of aquatic organisms after midseason drainage in the floodwater of Japanese paddy fields, Soil Science and Plant Nutrition, 49, 125-135（2003）
- 18) 林 紀男・大内 匠・宮田直幸：水田生態系に出現するワムシ類・ミジンコ類、千葉県立中央博物館自然誌研究報告、10(2)、71-79（2009）
- 19) 桐谷圭治、2008、田んぼの生きもの全種リストと指標候補第一次案、農と自然の研究所・生物多様性農業支援センター、pp.134、福岡。
- 20) Simpson I. C., A. R. Pierre, R. Official, I. F. Grant.: Effects of nitrogen fertilizer and pesticide management on floodwater ecology in a wetland ricefield. Biol. Fertil. Soils. 17, 138-146（1994）
- 21) Taniguchi M, Toyota K, and Kimura M.: Seasonal variation of microcrustaceans and microbial flora on their surface in the overlying water of a Japanese paddy field, Soil Science and Plant Nutrition, 43, 651-664（1997）
- 22) Yamazaki M, Hamada Y, Ibuka T, Momii T, and Kimura M.: Seasonal variation of community structure of aquatic organisms in a paddy field under a long-term fertilizers trial, Soil Science and Plant Nutrition, 47, 578-599（2001）
- 23) 鈴木正貴・水谷正一・後藤章：水田生態系保全のための小規模水田魚道の開発、農業土木学会誌、68(12)、1263-1266（2000）
- 24) 有田博之：水田魚道小型化のための小排水路・圃場間の段差縮小、農業土木学会論文集、241、67-72（2006）
- 25) 田中伸一：技術テーマ小規模魚道の技術開発、H18-H20多様な生産基盤活用技術開発事業調査報告資料、pp.26、社団法人農村環境整備センター、東京（2008）
- 26) 藤田裕子・中原紘之：農法の違いが水田土壌中の藻類群集に及ぼす影響、陸水学雑誌、60、77-86（1999）
- 27) 浜崎健児：慣行農法水田と有機農法水田におけるア

- メリカカブトエビ *Triops longicaudatus* (LeConte) の発生、日本応用動物昆虫学会誌、43(1)、35-40 (1999)
- 28) 濱村謙史朗・高橋宏和・橋本仁一・竹下孝史・則武晃二・鶴谷明字、2000、殺菌剤を利用した水田藻類制御の可能性とその応用、45、148-149 (1999)
(受付 2009. 4 . 13)
(受理 2009. 6 . 4)