緑藻類繁茂ハス田田面水における溶存酸素濃度変動が ハス田土壌からのリン溶出に及ぼす影響

飯 尾 恒^{1,2)} 小 室 俊 輔¹⁾ 北 村 立 実^{1), 1)}
松 本 俊 一^{1, 3)}

Effect of Varying Dissolved Oxygen Concentration on Elution of Phosphate from Lotus Paddy Field Soil in Paddy with Abundant Green Algae

Wataru IIO^{1,2)}, Shunsuke KOMURO¹⁾, Tatsumi KITAMURA^{1), 1)} and Shunichi MATSUMOTO^{1, 3)}

¹⁾ Ibaraki Kasumigaura Environmental Science Center, 1853 Okijuku, Tsuchiura, Ibaraki 300-0023, Japan

²⁾ Ibaraki Prefectural Livestock Research Center, 1234 Negoya, Ishioka, Ibaraki 315-0132, Japan

³⁾ Ibaraki Prefectural Western Region Residents Center, 615 Niginari, Chikusei, Ibaraki 308-0841, Japan

Abstract

Ibaraki Prefecture produces the largest volume of lotus root in Japan. In a previous study, we reported that the runoff load of total phosphorus (TP) in the Teno area, Tsuchiura city, Ibaraki Prefecture, became maximum in summer. Therefore, in this study, we investigated lotus paddy field with abundant green algae in the Teno area, focusing on the concentrations of dissolved oxygen (DO), TP, and phosphate ($\text{PO}_4\text{-P}$). As a result, DO in the green-algae-abundant lotus paddy field became supersaturated with increasing amount of green algae. On the other hand, DO in the green-algae-abundant lotus paddy field showed a concentration decrease to less than 4 mg L^{-1} with increasing amount of lotus leaves in summer. Furthermore, the concentration of TP with DO of less than 4 mg L^{-1} was about twice that after the lotus was harvested. The green-algae-abundant lotus paddy field had a significantly higher percentage of $\text{PO}_4\text{-P}$ in TP than the Sakai River agricultural water that was used. These results indicated that the green-algae-abundant lotus paddy field exhibited a reduced DO concentration and increased elution of phosphate from the paddy soil in summer. As a consequence, the concentration of TP in the green-algae-abundant lotus paddy field was increased in summer.

Keywords: Lotus paddy fields; Green algae; Dissolved oxygen; Phosphorus; Elution

1. はじめに

霞ヶ浦は茨城県、栃木県および千葉県の一部を流域とする日本第二位の湖沼面積を有する湖であり、古くから人々に幅広く利用されている湖である。しかし、霞ヶ浦は平均水深が約4 mと浅く、湖水の交換に約200日かかることなどから富栄養化しやすい湖でもある。実際に1970年代からアオコが大発生したのを始め、富栄養化に伴った様々な問題が生じたため、水質改善対策を講じてきたが、劇的な水質改善には至っていない。

ハスはハス科ハス属に属する抽水植物であり、その地下肥大茎はレンコンと呼ばれ、古くから日本で食されてきた作物である。霞ヶ浦周辺はレンコン栽培が非常に盛んな地域であり、茨城県のレンコン栽培面積および出荷量は全国の半分近くを占め、第一位である¹⁾。レンコンの収穫方法には水掘りと手掘りがあり、茨城県では水掘

りにて収穫している。この水掘りはポンプの水圧で泥を飛ばしレンコンを収穫するため、作業効率は良いが濁水が生じやすく、濁水が河川や排水路を通して霞ヶ浦に流入することから霞ヶ浦の水質汚濁の一因とされている²⁾。実際に、霞ヶ浦流域における霞ヶ浦への排出負荷量のうち、ハス田は全窒素(TN)で約0.3%、全リン(TP)で約2.1%を占めている³⁾。茨城県土浦市手野地区のハス田群は日本で初めて基盤整備したハス田群であり、この基盤整備による水質への影響を、我々は最近報告した⁴⁾。その中で、ハス田群からの排水において夏季にTPの排出負荷量が急に上昇した。この結果は、ハス田田面水の溶存酸素(DO)濃度が低下し、ハス田土壌および排水路堆積物から $\text{PO}_4\text{-P}$ が溶出したことにより起こったことが示唆された。

そこで、本研究では茨城県土浦市手野地区の緑藻類が繁茂するハス田(緑藻類繁茂ハス田)を調査対象とし、

1) 茨城県霞ヶ浦環境科学センター 〒300-0023 茨城県土浦市沖宿町 1853

2) 茨城県畜産センター 〒315-0132 茨城県石岡市根小屋 1234

3) 茨城県県西県民センター 〒308-0841 茨城県筑西市二本成 615

1) 連絡先: ta.kitamura@pref.ibaraki.lg.jp

ハス田土壌からのリンの溶出を検討するために DO 濃度および TP 濃度、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度の一年間の変動を調査したので報告する。

2. 方法

2.1 調査ハス田

調査ハス田は、茨城県土浦市手野地区にあるハス田 ($2,500 \text{ m}^2$) を対象にした。調査ハス田は種バスを植え付け後、緑藻類が繁茂するハス田であった。手野地区のハス田は用排分離されているため、調査ハス田は手野地区西側に流れる境川の水をパイプラインを通して用水として利用し、排水は排水路に直接排出している。また、手野地区は基盤整備によりコンクリート畦畔を整備しているため、他のハス田や排水路への漏水はないと考えられる。

2.2 調査方法

調査は、2018 年 4 月 5 日から 2019 年 3 月 27 日までの約 1 年間実施した。サンプルは、調査ハス田の給用水蛇口から 5 m 程度離れた給水側のハス田畦畔の中央付近の場所で田面水を週一回採水し、ペッテンコーヘル水温計にて水温を測定した。また、同日に境川からも週一回採水および水温を測定した。

DO 濃度分析用のサンプルは、JIS K 0102 に準じて、よう素滴定法にて測定した。飽和 DO 濃度については、境川を水源の一つとする霞ヶ浦の塩化物イオンの濃度から、JIS K 0102 より塩化物イオン 0 mg L^{-1} の値を近似値として引用した^{5, 6)}。水質分析用サンプルは、原水と、孔径 $1.0 \mu\text{m}$ のガラス繊維ろ紙でろ過したろ液に分けた。原水は、JIS K 0102 に準じて、TP の分析に供した⁶⁾。また、原水は孔径 $1.2 \mu\text{m}$ のガラス繊維ろ紙でろ過後、ろ紙をエタノール抽出法にてクロロフィル a (Chl.a) の分析に供した⁷⁾。ろ液は、JIS K 0102 に準じて、 $\text{PO}_4\text{-P}$ および $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の分析に供した⁶⁾。

緑藻類同定には、6 月および 11 月に採取した緑藻類を、光学顕微鏡 (BX51, OLYMPUS) で検鏡し、文献 8, 9) を用いて同定した。

2.3 統計処理

ハス田田面水内のリン濃度変動を解析するため、DO 濃度が 4 mg L^{-1} を連続して下回った 8 月 1 日から 9 月 4 日までの 6 週を DO 濃度低下時群とした。また、農作業等の人為的影響が少ないレンコン収穫後から 2 月末までの 11 週を収穫後群とした。 $\text{PO}_4\text{-P}$ 割合は各期間の TP の中に占める $\text{PO}_4\text{-P}$ の割合とした。リン濃度変動は、統計解析ソフト R (ver.3.5.2) を用いて、F 検定を行った後、Student の T 検定を行った。また、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 割合は、Wilcoxon の順位和検定を行った。

3. 結果および考察

3.1 調査ハス田の緑藻類および浮草の季節変動

茨城県のハス田では、レンコン特有の病気と収穫方法から通年湛水で、ハス田を管理している^{2, 10)}。このため、ハス田では緑藻類や浮草が繁茂しやすく、緑藻類が主に繁茂するハス田と浮草が主に繁茂するハス田に大別される。浮草は光を遮ることにより水温低下を引き起こすため、浮草が主に繁茂するハス田の方が農業においては問題になる。今回、調査したハス田は緑藻類が主に繁茂するハス田であった。調査ハス田は、4 月上旬に種バスの

植付けを行った (図 1A)。5 月下旬になるとアミミドロ (*Hydrodictyon reticulatum*) が急激に繁茂し、ハス田全体をアミミドロが覆った。しかし、6 月中旬に緑藻類が急に枯れ、7 月上旬には褐色になっていた (図 2A)。アミミドロが枯れた時期やその枯れ方から、農薬散布の影響が考えられた。7 月下旬にはハスの立葉が繁茂し、水面に光が差し込まなくなるとともに、生き残っていたアミミドロは確認できなくなった。10 月に入るとハスの立葉は枯れ、レンコンの収穫が 10 月中旬から 12 月中旬まで毎日行われた。掘り取り中に、アオミドロ属 (*Spirogyra* sp.) が一時的に発生した (図 2B)。収穫後は、湛水状態を保ち続け、3 月下旬に基肥および石灰窒素を施用した。

3.2 ハス田田面水の DO 濃度変動

調査ハス田田面水の DO 濃度および Chl.a 濃度、TP 濃度、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度の変動を図 1B, C に示した。4 月上旬に DO 濃度が飽和 DO 濃度を大きく上回ったが、Chl.a 濃度の結果から、植物プランクトンの増殖により DO 濃度が過飽和になったと考えられた。また、5 月末から DO 濃度が急激に上昇し、DO 濃度が再度過飽和になった。この結果は、生産者が農薬散布を必要とする量のアミミドロが発生 (大発生) した影響であると考えられた。実際に、採水の際に多数の気泡がアミミドロに多数付着していることを確認した。アミミドロが枯れた 7 月上旬に TP 濃度および $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度が上昇したが、これらはアミミドロが枯れ、分解された影響であると考えられた。7 月中旬から急激に DO 濃度が低下し、8 月になると DO 濃度が底泥から $\text{PO}_4\text{-P}$ が溶出することで知られる 4 mg L^{-1} を 6 週連続で下回った¹¹⁾。その後、立葉が枯れ始め水面に光が差すようになると、DO 濃度は飽和濃度に達した。10 月中旬からレンコンの収穫が始まると共に、アオミドロ属が発生し、DO 濃度が上昇した。11 月中旬に採水場所前で収穫作業が行われたため、濁水の影響で DO 濃度測定および Chl.a 測定ができず、欠損となった。収穫作業が終わると DO 濃度は飽和濃度付近に落ち着いた。3 月下旬になると基肥施用の影響および水温上昇に伴い、植物プランクトンが再度急激に増加したため再度 DO 濃度が急上昇した。本研究の 4 月上旬に DO 濃度が過飽和になったのは、この植物プランクトンが同様な要因で 3 月下旬から 4 月上旬まで増殖したためと考えられた。このことから、ハス田田面水の DO 濃度はハスの生育状況および緑藻類を含む植物プランクトンの繁殖状況に強く影響されることが示唆された。用水である境川の TP 濃度および $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度はハス田田面水と比較すると極めて安定的に推移した (図 1D)。

3.3 DO 濃度低下時におけるリン濃度変動

調査ハス田 DO 濃度低下時におけるリン濃度を図 3 に示した。調査ハス田は手野地区西側を流れる境川の水を用水として用いていることから、比較対照として境川の水質も同様の解析を行った。DO 濃度低下時と収穫後の期間の TP 濃度を比較するとハス田において、DO 濃度低下時に TP 濃度が高い傾向が示された (図 3A)。しかし、用水である境川においては、有意な差は認められなかった。また、各期間における $\text{PO}_4\text{-P}$ 割合を算出し、ハス田と境川を比較した (図 3B)。その結果、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 割合は DO 濃度低下時にハス田が境川に比べ、有意に高い値を示した。しかし、収穫後はハス田と境川間に有意な差

は認められなかった。これらのことから、ハス田は DO 濃度低下時に TP 濃度が高くなり、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 割合も高くなったことが明らかとなった。湖沼において嫌気状態になると底泥からリンが溶出することが知られているが、霞ヶ浦の底泥では DO 濃度が 4 mg L^{-1} を下回ると $\text{PO}_4\text{-P}$ が溶出することが報告されている^{11, 12)}。また、湖沼の底泥からの無機態リン溶出は硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$) 濃度が高いと抑制されることが知られているが、Ishii らは霞ヶ浦底泥を用いた無機態リン溶出試験および実際の霞ヶ浦調査研究から霞ヶ浦の無機態リン溶出が流入河川の高

$\text{NO}_3\text{-N}$ 時期 ($0.37\sim0.98 \text{ mg L}^{-1}$) に抑制されたことを報告している^{13, 14)}。茨城県のアミドロ属ハス田では通年湛水の影響により、アンモニア態窒素の硝化が進まないため $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が低い状態を保っている。実際に、本調査期間中のハス田の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は $0.11 \pm 0.17 \text{ mg L}^{-1}$ (平均値 $\pm$ 標準偏差) であったのに対し、境川では $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が $1.76 \pm 0.73 \text{ mg L}^{-1}$ であった。このため、水稲田と比べ窒素施用が多いハス田においても、 $\text{NO}_3\text{-N}$ による土壌からの無機態リン溶出が抑制されていないことが考えられた。これらのことから、ハス田において DO 濃度が低下する

図1 調査ハス田田面水の水質変動, (A) 調査ハス田における DO 濃度変動要因および農作業, ハスの生育状況を示す。(B) 調査ハス田田面水の DO 濃度および飽和 DO 濃度を示す。過飽和の影響で、DO 濃度変動の詳細が読み取りづらいため、図上部に5月から3月にかけて一部拡大した図を示す。(C) 調査ハス田田面水の TP 濃度および $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度, Chl.a 濃度を示す。(D) 用水である境川の TP 濃度および $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度を示す。

図2 調査ハス田繁茂緑藻類拡大図, (A) 5月下旬から繁茂したアミミドロ (*Hydrodictyon reticulatum*) を示す。(B) 10月中旬から繁茂したアオミドロ属 (*Spirogyra* sp.) を示す。

図3 調査ハス田田面水におけるTP濃度およびPO₄-P割合, 図は平均値±標準誤差を示す (†*p* < 0.1, ***p* < 0.01)。

ことにより, ハス田土壌からPO₄-Pが溶出され, TP濃度を上昇させることが示唆された。

4. まとめ

茨城県土浦市手野地区においてDO濃度およびTP濃度, PO₄-P濃度に着目し, 1年間に渡り調査を行った結果, 以下の知見が得られた。緑藻類繁茂ハス田の田面水のDO濃度は緑藻類を含む植物プランクトンの発生状態に大きく影響され, 植物プランクトンが発生している時は, DO濃度は過飽和状態になりやすいことが示唆された。また, 夏季にはハスの立葉が繁茂するため植物プランクトンの発生が抑制され, DO濃度が低下しやすく, それに伴い, ハス田土壌からPO₄-Pが溶出することが示唆された。今回の結果より, 光を遮る浮草が繁茂するハス田の方がよりDO濃度が低下しやすことが予想されることから, 今後, 浮草繁茂のハス田においても同様な調査を行うことでハス田土壌からのリン溶出量が明らかとなり, 緑藻類繁茂ハス田および浮草繁茂ハス田ごとのリン施肥量の見直しが可能となる。その結果, ハス田群からのリン流出負荷量削減対策およびレンコン生産者のコストダウンに繋がることが期待される。

謝 辞

本研究を遂行するにあたりご協力いただいたレンコン生産者橘 隆史氏に感謝の意を表す。

(原稿受付 2019年11月8日)

(原稿受理 2020年2月25日)

参 考 文 献

- 1) 農林水産省, 2019. 平成30年産指定野菜(秋冬野菜等)及び指定野菜に準ずる野菜の作付面積, 収穫量及び出荷量. URL: http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/sakkyou_yasai/index.html (2020年4月時点)。
- 2) 沢田英司, 2010. 新特産シリーズレンコン栽培から加工・販売まで. 社団法人農山漁村文化協会, 東京。
- 3) 茨城県, 栃木県, 千葉県, 2017. 霞ヶ浦に係る湖沼水質保全計画(第7期). URL: <https://www.pref.ibaraki.jp/seikatsukankyo/kantai/kasumigaura/lake/kasumi-plan7.html> (2020年4月時点)。
- 4) 飯尾恒, 吉田繁樹, 北村立実, 松本俊一, 黒田久雄, 2019. ハス田群からの水質汚濁物質流出負荷量に対する基盤整備の影響. 水環境学会誌 42(4), 171-176。
- 5) 茨城県霞ヶ浦環境科学センター, 2019. 1-4 霞ヶ浦湖内水質等モニタリング事業. 茨城県霞ヶ浦環境科学センター年報 13, 55-70。
- 6) 日本工業標準調査会, 2016. JIS K 0102:2016 工場排水試験方法. 日本規格協会, 東京。
- 7) 根本富美子, 小野美幸, 福原春夫, 2009. 淡水域のChlorophyll-a測定におけるエタノール抽出条件の検討. 新潟大学教育学部研究紀要 1(2), 101-105。
- 8) 滋賀の理科教材研究委員会, 2008. 普及版やさしい日本の淡水プランクトン図解ハンドブック改訂版. 合同出版, 東京。
- 9) 廣瀬弘幸, 1977. 日本淡水藻類鑑. 内田老鶴圃, 東京。
- 10) 茨城県農業総合センター, 2016. 野菜栽培基準, pp.167-170。
- 11) 細見正明, 須藤隆一, 1984. 9. 霞ヶ浦底泥からの窒素及びリンの抽出について—高浜入を中心として—, 国立公害研究所研究報告 51, 191-217。
- 12) Mortimer, C.H., 1942. The exchange of dissolved substances between mud and water in lakes. Journal of Ecology 30(1), 147-201。
- 13) Dittrich, M., Wehrli, B., Reichert, P., 2009. Lake sediments during the transient eutrophication period: reactive-transport model and identifiability study. Ecological Modelling 220, 2751-2769。

- 14) Ishii, Y., Yabe, T., Nakamura, M., Amano, Y., Komatsu, N., Watanabe, K., 2009. Effect of nitrate on phosphorus

mobilization from bottom sediment in shallow eutrophic lakes. Journal of Water and Environment Technology 7(3), 163-176.

[論文要旨]

茨城県のレンコン出荷量は全国一位を占めている。これまでの研究で、茨城県土浦市手野地区のハス田群において、夏季に TP の流出負荷量が上昇した。この原因解明のため、本研究では手野地区の緑藻類がほぼ全面に繁茂するハス田において DO 濃度および TP 濃度、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度の調査を行った。その結果、ハス田田面水は緑藻類を含めた植物プランクトンの発生に伴い、DO 濃度が過飽和になることが認められた。さらに、ハスの立葉が繁茂し始めると、DO 濃度が 4 mg L^{-1} 以下への低下が認められた。また、ハス田田面水の DO 濃度が 4 mg L^{-1} 以下になると、TP 濃度がレンコン収穫後と比べ約 2 倍に上昇し、TP の中で $\text{PO}_4\text{-P}$ が占める割合が用水に比べ、ハス田で有意に高い値を示した。これらのことから、緑藻類繁茂ハス田では、夏季に DO 濃度が低下し、その影響でハス田底泥から $\text{PO}_4\text{-P}$ が溶出し、TP 濃度が上昇することが示唆された。

キーワード：ハス田；緑藻類；溶存酸素；リン；溶出