

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24580346

研究課題名(和文) 水田からのリン回収に関する基礎的研究

研究課題名(英文) Study on the recycle of phosphate from paddy fields

研究代表者

花山 奨 (HANAYAMA, Susumu)

山形大学・農学部・准教授

研究者番号：20282246

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、リン資源を有効利用する方法の一つとして水田からリンを回収する技術確立することである。この技術開発の第一段階として水田土壌からリンが溶出するメカニズムに関する基礎的実験を実施した。結果は以下のとおりである。田面水のpH上昇(pH>9)にともない土壌から田面水へリンが溶出することが明らかとなった。田面水のpH上昇に關与する付着藻類の増殖は土壌中の微生物活動にともなう窒素動態に影響されることが明らかとなった。田面水の対流が付着藻類の増殖に影響をおよぼすことが示唆された。

研究成果の概要(英文)：Using phosphate efficiently is important because phosphate is one of the nutrients that are essential for plant growth and one of the limited resources. The purpose of this study is to develop a new system to recycle of phosphate from paddy fields. In order to attain this goal, we investigated the mechanism that phosphate accumulated in paddy soil is released to flooded water and obtained following results. First, the phosphate in paddy soil is released to flooded water when the pH of flooded water is larger than 9. Second, the growth of periphyton relating to increase in pH of flooded water depends on the nitrogen dynamics with the activation of microorganisms in paddy soil. Third, the growth of periphyton may be affected by the convection of flooded water.

研究分野：農村農業工学

キーワード：リン 水田 田面水 pH 藻類 対流

1. 研究開始当初の背景

リンは作物生産において重要な栄養素である。現在、リン肥料の大部分はリン鉱石から作られており、リン資源を保持する国々はリン鉱石の輸出を規制しはじめている。わが国はリン鉱石を100%輸入に依存しており、リン資源を有効利用する技術の開発はわが国にとって重要な問題である。

日本において輸入されたリンの大部分が肥料として使われており、現在では水田面積のおよそ50%でリン施肥が制限されるほど土壤中にリンが蓄積している(農水省, 2009)。近年、様々な資材を用いて水中からのリンを回収する技術の開発が進んでおり(Takeda et al., 2010)、このような技術が発展すれば土壤に蓄積したリンを回収することも可能と考えられる。その一例として、水田土壤から田面水に溶出したリンを回収することである。

底泥に多量の有機物が蓄積された水深の浅い湖沼では、底泥表面に藻類が繁殖する。藻類の光合成によって底泥直上の水のpHが上昇すると、底泥表層で酸化鉄などと結合していたリンが解離し底泥から湖水に溶出することが知られている(Jin et al., 2006)。水田もまた日中藻類の光合成によって田面水のpHが上昇することから(Usui et al., 2003)、土壤表層の酸化層から田面水へのリン溶出が推測される。

そこで、水田からリンを回収する技術の開発の第一段階として、水田土壤からリンが溶出するメカニズムに関する基礎的実験を実施した。

2. 研究の目的

本研究の目的は以下の3点である。

(1) 田面水のpH変化によって土壤から田面水へリンが溶出するか検証する。

(2) 田面水のpH変化に影響および付着藻類の増殖および活性化における生物学的および化学的要因を明らかにする。

(3) 田面水の対流が付着藻類の生理活性におよぼす影響を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 実験①：田面水のpH変化による土壤から田面水へリンが溶出

実験には、沖積土壌である山形大学農学部附属やまがたフィールド科学センターの堆肥を連用した水田圃場の表土を風乾したものを用いた。この土壌を蒸留水でかき混ぜ、かき混ぜた土を3cm厚になるように300ccのビーカーに充填し、その上に水深5cmとなるように蒸留水を注入したポット水田を作成した。ポット水田は温度15℃、照度18klx、14時間明期/10時間暗期の明暗周期の人工気象器内に静置され藻類を培養した。培養期間は20日とし、培養期間中に田面水中の溶存酸素濃度(DO)、pH、全リン濃度の変化を調べた。

(2) 実験②：付着藻類の増殖および活性化における生物学的および化学的要因

土壤の種類、および土壤に施した処理をのぞいて実験および測定方法は前述の実験①とほぼ同じである。実験に用いた土壌は、山形大学農学部附属やまがたフィールド科学センター(沖積土壌)と山形県立農業大学校(火山灰土壌)のそれぞれにおいて化学肥料を連用している水田圃場から採取した表土を風乾したものである。また、沖積土壌の水田土については尿素および硝酸カリウムをそれぞれ5gN/m²と10gN/m²ずつ添加した土壌についても実験に用いた。これらの土によるポット水田は温度15℃および25℃、照度18klx、16時間明期/8時間暗期の明暗周期の人工気象器内に静置され藻類を培養した。そして、培養期間中の田面水中のDO、pH、全リン濃度の変化を調べた。

(3) 実験③：田面水の対流が付着藻類の生理活性におよぼす影響

Fig. 1は大気-水面間の温度差によって対流を制御するための装置の概略図である。恒温器中にヒーターを取り付けたプラスチック製の恒温槽(水温20℃)を配置し、プラスチック製の容器(内寸:直径11cm×高さ8cm)に代かき土を2cm厚になるように充填し、その上に水深5cmとなるように水を注入したポット水田を恒温槽内に静置した。対流センサーはポット水田の田面水中にセンサーの金属線が浸かるようにスタンドで固定した。本実験では、大気-水面間の温度差のみで対流を発生させるため、ポット水田の水面を食品包装用の透明フィルムで被覆し蒸発を防止した。田面水の対流はポット水田の水温と田面水表面から1cm上の気温との間の温度差が0℃から9℃になるよう恒温器の温度を調節して発生させた。また、対流速の測定は花山・安中(2009)による方法を適用した。

田面水の対流が付着藻類の生理活性におよぼす影響について、付着藻類による田面水中の溶存酸素消費に関する実験をFig. 1の装置を用いて行った。付着藻類を発生させたポット水田を20℃の恒温槽に設置し、ポット水田の水温と田面水表面から1cm上の気温との間の温度差が0℃と9℃になるよう恒温器の温度を調節した。ポット水田の水面は透明フィルムで被覆し、水面からの蒸発と大気か

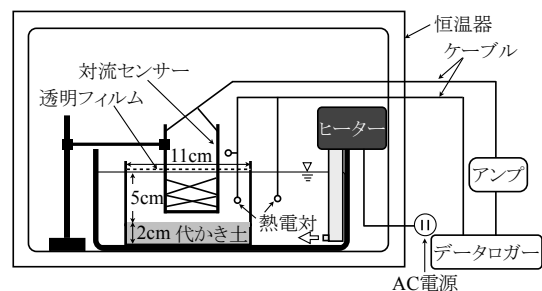


Fig.1 対流制御装置の概略図

ら田面水への酸素の溶解を防止しながら田面水の DO の変化を測定した。なお、この実験で用いた土は山形大学農学部附属やまがたフィールド科学センターの水田圃場の表土である。

4. 研究成果

(1) 田面水の pH 変化にともなう土壌から田面水へのリン溶出について

Fig. 2 は田面水の DO と pH の変化を示す。実験開始から約 1 週間の DO は飽和溶存酸素量(9.76mg/L, 水温 15°C)より少なかった。その後、DO は増加し飽和溶存酸素量を上回り、機器の測定上限値 22mg/L まで達した。田面水の pH は 9 日目以降大きく上昇し最大で 10.6 となった。Fig. 3 は田面水中の全リン濃度の変化を示し、全リン濃度は実験開始から増加し続け、田面水の pH 変化によって土壌から田面水へリンが溶出することが確認された。

実験開始から約 1 週間において DO は飽和溶存酸素量を下回っており、土壌表層は還元状態となっていたと推測される。つまり、実験開始から 8 日目の全リンの増加は、還元化によって可溶化された土壌中のリン酸が田面水に溶出したと考えられる。8 日目以降では DO は飽和溶存酸素量を上回り、土壌表層は酸化状態であったと判断される。水田の土壌表層に形成される酸化層は土壌からのリン溶出を抑制することが知られている(和田, 1996)。これは、土壌の還元化によって生じた第一鉄やマンガンイオンが酸化層内の酸素と反応して吸着性に富む水酸化物となり、それにリン酸が吸着するためと考えられている。Brönmark and Hansson (2007) によると、pH が 8 以上になると、金属イオンと結合していたリン酸は水酸化物イオンと交換して解離するようになる。8 日目以降、土壌表面で増殖した付着藻類の光合成は田面水および土壌表層の酸化層内の pH を上昇させたと推察される。つまり、8 日目以降の全リン濃度の増加は、酸化層内の pH 上昇によって酸化層内に存在する鉄の水酸化物と結合していた一部のリン酸が pH 上昇によって解離し、その解離したリンが田面水に溶出したと考えられる。

(2) 付着藻類の増殖および活性化における生物学的および化学的要因について

① 沖積土壌の場合

実験①の堆肥を連用した水田土壌の場合と同様に、化学肥料を連用した水田土壌でも田面水の pH が 9 を超えると土壌からリンが溶出することが示された。ただし、この現象は 25°C のみで確認された。

温度は藻類および土壌中の微生物のいずれの活動にも影響をおよぼす。実験①の堆肥連用土においては 15°C のもとで付着藻類の増殖および活性化が認められた。これは、15°C でも別の要因が満たされれば付着藻類

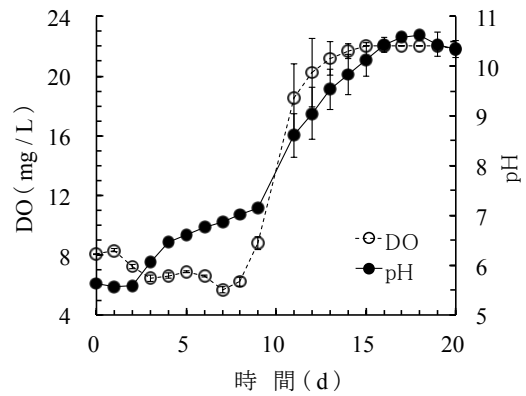


Fig. 2 田面水の DO と pH の変化

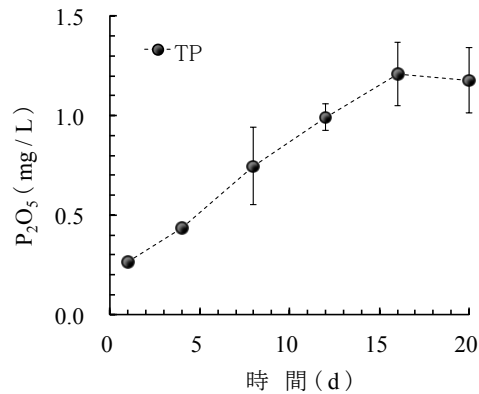


Fig. 3 田面水の全リン濃度の変化

は増殖および活性化することを示唆する。

土壌表面に発生する付着藻類は土壌中の栄養塩を利用でき、土壌中の栄養塩は温度によってその動態が変化する。堆肥連用土と化学肥料連用土の土壌特性を比較すると、土壌中の全炭素量と全窒素量は堆肥連用土(全炭素量 35g/kg, 全窒素量 3.1g/kg)より化学肥料連用土(全炭素量 21g/kg, 全窒素量 2.6g/kg)より多い。この違いから、化学肥料連用土における土壌微生物による有機態窒素の無機化量は堆肥連用土の場合に比べ少ないものと予想される。そこで、化学肥料連用土にアンモニア態窒素および硝酸態窒素を添加したところ、硝酸態窒素を添加した場合のみ付着藻類の増殖および活性化が見られた。この結果は、付着藻類の増殖および活性化が酸化層内の硝化作用に影響されることを示唆する。

② 火山灰土壌の場合

15°C では田面水の pH は最大 7.6 とあまり上昇せず、全リン濃度も増加しなかった。一方、25°C では田面水の pH が 10 近くまで上昇したにもよらず全リン濃度は増加しなかった。25°C では田面水の pH が上昇し始めた 5 日目頃から、アナベナとその粘質鞘によって形成された寒天状物質で土壌表面が覆われた。本実験では、この寒天状物質の上にある田面水の全リン濃度を測定した。それゆえ、田面水の pH 上昇にともなう土壌から溶出したリンはアナベナに吸収されたため、その

寒天物質上の田面水の全リン濃度が上昇しなかったと考えられる。

使用した火山灰土壌中の全窒素量 (2.5g/kg) は、上述の沖積土壌の全窒素量 (2.6g/kg) とほぼ同じであった。有機態窒素の無機化速度は土壌の種類によって異なり、一般に無機化速度は灰色低地土より火山灰土で遅い (西尾, 1989)。安藤ら (1986) は、地力窒素の無機化モデルを用いてその無機化の特徴を調べ、庄内地域の水田土壌より最上地域の水田土壌において有機態窒素の分解速度が遅いことを示した。観察されたアナベナは窒素固定が可能な種であったことから、火山灰土壌における有機態窒素の無機化の遅れによってアナベナが発生したと考えられる。

以上より、上記の2種類の土壌を用いた実験から藻類の増殖は土壌中の微生物活動にともなう窒素動態に影響されることが明らかとなった。

(3) 田面水の対流が付着藻類の生理活性におよぼす影響について

Fig. 1 で示された装置を使ってポット水田の水面上の温度を変化させたところ、田面水の対流速度はポット水田の水温と水面上の気温との間の温度差の増加にともない大きくなり、対流速度と温度差の間に高い線形の相関性 ($R^2=0.98$) があることが示された。また、田面水と気温との間の温度差 0°C から 9°C で生じる対流速度を花山・安中 (2009) による方法で推定したところ 0.0mm/s から 0.5mm/s となった。過去に測定された田面水の対流速度の日変化は、稲がない非植生下で約 0.4 から 1.6mm/s であり (Hanayama et al., 2009), 本装置を使ってより速い対流速度を再現するためにはさらなる検討が必要であることがわかった。

また、田面水の対流が付着藻類の生理活性におよぼす影響について、付着藻類の呼吸作用に注目し、暗条件下で対流の有無による藻類による DO 消費量の時間変化を調べた。その結果、対流速度 0.5mm/s における DO 消費量は 0.0mm/s における DO 消費量より多くなった。土壌表面上の付着藻類は水中を泳ぐことで酸素や栄養塩を獲得することができない。それゆえ、付着藻類への田面水の対流にともなう DO の供給が付着藻類の DO 消費量を増加させたものと考えられる。

以上より、水面冷却によって田面水の対流制御を可能とする装置を使うことによって、対流が藻類の酸素消費を促進することが示された。本結果は、田面水の対流が藻類の生理活性に影響をおよぼすことを示唆する。

工業的なリン回収は多くのエネルギーを必要とする。一方、水田の場合、水田に存在する生物の機能と太陽エネルギーを利用することによって低コストでリンを回収することが期待できる。本研究では、田面水の pH

上昇によって土壌から田面水へのリン溶出が確認されたが、溶出したリンは植物プランクトンや土壌表面の付着藻類に吸収され、大部分が有機態のリンに変化してしまうことが明らかとなった。水中からのリンを回収する技術のひとつとして、Takeda ら (2010) は木質資材を使って水中からのリン回収に成功している。木質資材などを含んだ他の物質にリンを吸着させてリンを回収する場合、リンが無機態であることが条件となる。それゆえ、コストおよび再利用の面から田面水からリンを回収するためには有機態リンを無機態リンに回帰させる必要がある。今後の展開として、有機態リンから無機態リンへの回帰に関する容易で安価な手法を見出すことが水田からのリン回収技術の更なる発展につながるものと考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

花山 奨, 安中武幸 2014 田面水の pH 変化が水田土壌からのリン溶出におよぼす影響 農業農村工学会論文集, 291, 49-50 (査読有り)

花山 奨, 安中武幸 2013 改良された田面水の対流制御装置による藻類の酸素消費実験 農業農村工学会論文集, 285, 77-78 (査読有り)

[学会発表] (計1件)

花山 奨, 安中武幸 ヒートプローブによる田面水の対流速度測定 土壤物理学会大会, 2014/10/25, 宮城大学 (宮城県仙台市)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

花山 奨 (HANAYAMA Susumu)

山形大学農学部 准教授

研究者番号: 20282246