

令和 5 年 10 月 20 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K06332

研究課題名(和文)水田における窒素除去機能を規定する環境要因とモデル化

研究課題名(英文) Environmental factors determining nitrogen removal rate in rice paddy and their modeling

研究代表者

松井 宏之 (Matsui, Hiroyuki)

宇都宮大学・農学部・教授

研究者番号：30292577

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：水田における硝酸態窒素除去量の推定を可能とするモデル開発を目的として、まず田面水の浸透による湛水中の負荷量変化や水の蒸発に伴う濃縮を組み入れた硝酸態窒素濃度の濃度変化を表す式を導出した。次に、室内実験により脱窒菌の温度依存性を確認し、供試土壌中の脱窒菌は30℃前後で脱窒活性が最大となった。また、蒸発量を制御した室内実験を行った結果、蒸発量が多いと湛水中の対流が促進され、硝酸態窒素除去係数が大きくなることがわかった。さらに、水中に浮遊する微生物による硝酸態窒素除去と土壌表面に定着した藻類による硝酸態窒素除去を比較したところ、土壌表面に定着した藻類による除去の方が大きい可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水田における硝酸態窒素除去量については現地での観測結果が多く、モデル開発への期待があるものの、現象の把握が容易でないため、あまり進んでいない。本研究において導出した硝酸態窒素濃度の濃度変化を表す推定式は、田面水の浸透による湛水中の負荷量変化や水の蒸発に伴う濃縮を考慮しており、水田のみならず比較的水深の浅い流水中での予測にも援用することができる。次に、田面水の蒸発が湛水中の対流を生み、硝酸態窒素除去速度と蒸発量が比例関係にあることは新しい知見であると考えており、今後の研究への貢献が期待される。

研究成果の概要(英文)：To develop a model that enables estimation of nitrogen removal rate in a rice paddy, I first derived an equation for the nitrogen concentration changes considering the nitrogen load changes due to infiltration of ponding water and the substance concentration due to evaporation of water. Secondly, I confirmed the temperature dependence of denitrifying bacteria through laboratory experiments, and found that the activity of the denitrifying bacteria was maximum at around 30 degree Celsius. Thirdly, It was found that high evaporation promoted convection in the ponding water and increased the nitrate nitrogen removal rate. Furthermore, comparison between nitrogen removal rates by microorganisms suspended in ponding water and by algae settled on the soil surface suggests that removal by algae settled on the soil surface may be greater.

研究分野：水利環境工学

キーワード：脱窒 硝酸態窒素除去速度 添加有機物 温度依存性

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

水田が有する多面的機能の一つとして窒素除去機能がある。水田における窒素除去は、(1)緑藻類による窒素の同化、(2)湛水土壤の比較的浅いところで形成される還元層における脱窒菌による脱窒により行われる。脱窒菌による脱窒は広く認められているものの、除去量を定量的に推定する式やモデルは非常に限られている。そうしたなかで、脱窒に関して代表的な推定式が田淵が一連の研究で示した式であり、硝酸態窒素の除去量 R は

$$R = F \cdot P \cdot R_0$$

ここで、 F : 植生の影響 (1~4)、 P : 水田内での滞留時間の影響 (0~1)、 R_0 : 室内実験による除去量 (= 濃度変化量 × 水田における湛水量)

と推定される。このうち、植生の影響を表す F や滞留時間の影響を表す P は、実圃場における測定結果からパラメータとして帰納的に求めることとなっている。滞留時間が長いほど除去量が多くなることは十分に考えられるものの、植生がどのような影響を与え、除去量を増加させるかについては検討されていない。また、室内実験による除去量 R_0 は、下に凸となる温度の二次関数となる係数 (硝酸態窒素除去係数) により規定される構造となっている。しかしながら、多くの脱窒菌は 30 付近を好適温度域としていることが示されており、除去量を下に凸となる二次関数で表現することと整合しない。加えて、田淵らは土壤への有機炭素の供給により硝酸態窒素除去量が増大することを示しているが、供給した有機炭素量と硝酸態窒素除去量の定量的な関係については検討するに至っていない。このように、水田における窒素除去機能に関わる研究には多くの検討すべき課題がある。流域の水環境保全を検討する際、水田における窒素除去機能は注目される機能であるにも関わらず、上記のようにそのモデル化は十分には行われていない。そのため、現象に基づいたモデル化を行うことで、適切な水環境保全策の検討・提示に貢献することができる。

2. 研究の目的

室内実験により、水田における硝酸態窒素除去機能に与える環境要因の影響を定式化するとともに、モデルの適用性を検証することを目的とし、具体的には(1)田面での硝酸態窒素濃度の濃度変化を現す式の検証、(2)硝酸態窒素除去速度の温度依存性および蒸発量との関係の検証、(3)土壌中の有機炭素が硝酸態窒素除去に与える影響の検討、(4)水中の藻菌等が硝酸態窒素除去に及ぼす影響の検討を行った。

3. 研究の方法

(1)硝酸態窒素濃度の濃度変化を現す式の導出

田面水は、水田に流入・流出するだけでなく、地中への浸透、大気への蒸発が生じる。浸透により濃度は変化しないものの、負荷量は減少する。蒸発では田面水が蒸発することにより濃度の濃縮が発生する。これら水田での水の動きの特徴を表現できる式を導出する。

(2)硝酸態窒素除去速度の温度依存性の検討

硝酸態窒素除去は温度に依存することから、温度条件として 10、20、25、30、35、40 の 6 条件を設定し、各設定温度につき反復数を 3 とし、水田模型を暗条件の恒温器内に設置した。水田模型は、宇都宮大学試験圃場で採取し、2 mm ふるいを通過した黒ボク土 110 g (土壌厚さ 2 cm 相当) を敷き詰めた内径 8.8 cm のガラスビーカーに、10 mgNO₃-N L⁻¹ 硝酸態窒素溶液 220 ml を注ぎ、水深 4 cm とした。水田模型中の水中の硝酸態窒素濃度は、蒸発の影響を受ける。そこで水田模型の水面は食品用フィルムで被覆し、蒸発を抑制した。実験開始後 8 時間、24 時間、48 時間経過時にシリンジを用いて溶液を採取した。採取したサンプルは液体クロマトグラフィ (島津製作所, LC-10ADvp 他) を用いて硝酸態窒素濃度を測定した。

蒸発量が硝酸態窒素除去速度に与える影響を検証するために、暗条件の恒温器内の湿度を数段階に設定し、水田模型を用いた硝酸態窒素除去速度を求める。

(3)土壌中の有機炭素が硝酸態窒素除去に与える影響の検討

脱窒菌は土壌中の有機物を利用して、脱窒を行う。そこで、水田模型中の土壌にメタノール、コハク酸、稲わらを粉碎し蒸留水中で一週間放置した稲わら懸濁液を添加して、硝酸態窒素除去速度に及ぼすについて検討した。

(4)水中の藻菌等が硝酸態窒素除去に及ぼす影響

実際の水田では、水中の藻類や菌類による窒素の吸収がある。そこで、稲わら懸濁液を用いて、湛水状態で一週間静置した水田模型で土壌がある条件と上澄み液のみの土壌がない条件に光条件 (明・暗) を組み合わせた条件での湛水中の硝酸態窒素濃度の変化を検討した。

4. 研究成果

(1)硝酸態窒素濃度の濃度変化を現す式

脱窒は土壌表層付近で生じ、水中の硝酸態窒素の負荷量 L の時間変化は土壌の表面積 A に比例することから、負荷量変化は次式により現される。

$$\frac{dL}{dt} = \frac{dCV}{dt} = -\alpha \cdot A \cdot C$$

ここで、 t ：時間、 C ：水中の硝酸態窒素濃度、 V ：水量、 α ：硝酸態窒素除去係数。
水田では浸透により浸透水量に硝酸態窒素濃度を乗じた負荷量が減少することから、浸透を考慮した負荷量変化は次式により現される。

$$\frac{dL}{dt} = \frac{dCV}{dt} = C \frac{dV}{dt} + V \frac{dC}{dt} = -\alpha \cdot A \cdot C(\alpha + P)$$

ここで、 P ：浸透量。

水田における水量変化は、

$$V = A \cdot (h_0 - (E + P) \cdot t)$$

$$\frac{dV}{dt} = -A \cdot (E + P)$$

ここで、 E ：蒸発量。

と現され、水中の硝酸態窒素濃度の変化は田淵らが示したように

$$\frac{dC}{dt} = -\alpha \cdot C$$

で現される。そこで、上記2式を負荷量変化の微分方程式に代入し解くと、蒸発および浸透を加味した水中の硝酸態窒素濃度の変化を予測できる下記の式が得られる。

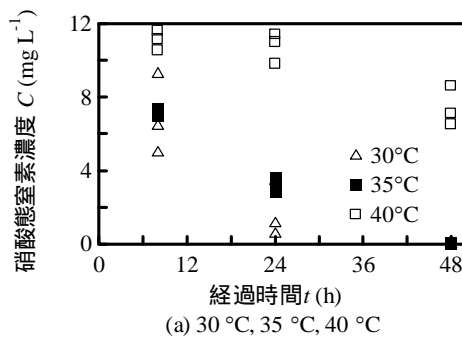
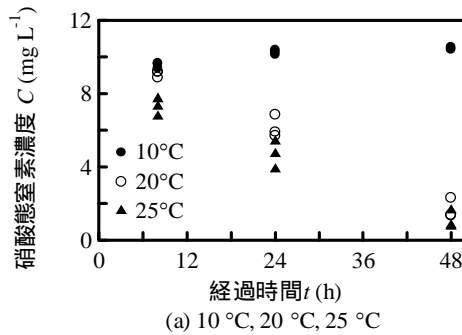
$$C = C_0 \left(1 - \frac{(E + P)t}{h_0} \right)^{\frac{\alpha - E}{E + P}}$$

ここで、 h_0 ：湛水深、 C_0 ：初期濃度。

が得られる。なお、上記の式は浸透および蒸発がないとき、田淵らが示した硝酸態窒素濃度変化の予測式と同一の式となる。

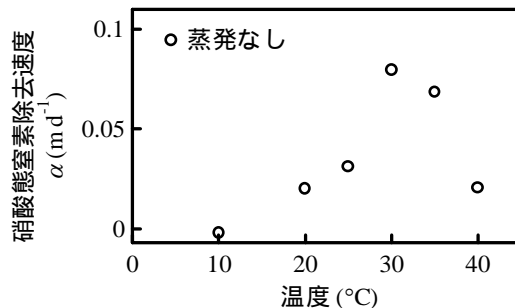
(2)硝酸態窒素除去速度の温度依存性

設定した6つの温度における湛水中の硝酸態窒素濃度の変化を下図に示す。



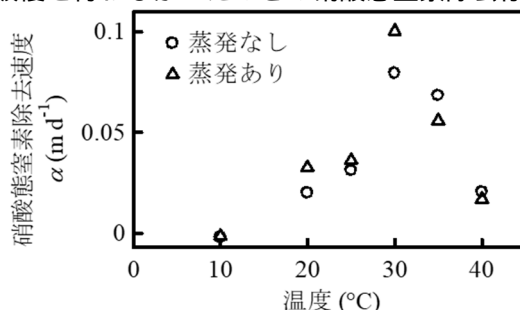
10 では初期濃度から上昇しており、土中の硝酸態窒素が溶脱していることが考えられた。20、25 の試験区では一律に濃度が低下し、30、35 の試験区では36時間まで濃度が低下し、48時間経過時点で硝酸態窒素が検出できなくなった。一方、40 では30や35の試験区ほど、濃度の低下が認められなかった。

上記の結果から、温度別の硝酸態窒素除去係数は下記のとおり得られる。



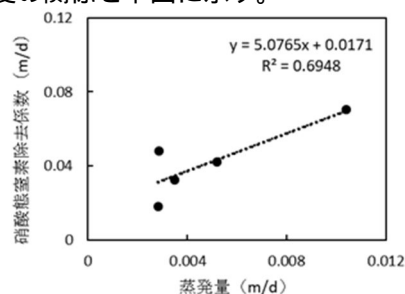
硝酸態窒素除去係数が 30 をピークとして、凸となる形状を示している。多くの先行研究において脱窒菌の多くが 30 から 35 付近を好適な温度域としていることと整合している。

同じ実験方法で、水面被覆を行わなかったときの硝酸態窒素除去係数を下図に示す。



導出した式を用いることにより、蒸発のあり・なしによる硝酸態窒素除去係数の違いを適切に評価することが可能になっている。

蒸発量と硝酸態窒素除去速度の関係を下図に示す。



蒸発量が大きくなると、硝酸態窒素除去速度（硝酸態窒素除去係数）が大きくなる傾向があり、水面蒸発が湛水中の対流を促したため、想定的に土壌への硝酸の供給が増えたためと考えられる。

(3) 土壌中の有機炭素が硝酸態窒素除去に与える影響

環境条件が硝酸態窒素濃度の変化に及ぼす影響を効率的に検討するために、添加有機物を検討した。まず、農地土壌に存在するコハク酸を添加したところ、同一の実験区でのバラツキは少なく、1 gC/L となるコハク酸を添加したときは硝酸態窒素除去速度が 0 ~ 0.015 m/d となるのに対し、0.1 gC/L 添加では 0.06 ~ 0.18 m/d となった。1 gC/L 添加区では硝酸還元と見られる気泡の発生があり、脱窒菌の好適な条件でなかったために、硝酸態窒素除去速度が低くなったものと考えられる。これに対し、0.1 gC/L 添加区では脱窒菌にとって好適な環境が形成されたために、実際の水田と比べると過大な硝酸態窒素除去速度になったものと考えられる。次に、メタノールを添加した実験における硝酸態窒素除去速度は 0.03 ~ 0.09 m/d と実際の水田に近い値が得られた。しかしながら、コハク酸と比較すると、同一実験区内でのバラツキが大きい傾向が認められた。人工的に精製された有機物でなく、50 mgC/L となる稲わら懸濁液を用い実験では、硝酸態窒素除去速度は 0.003 m/d と実際の水田と比べると 1 オーダー小さくなった。これは稲わらでは易分解性の有機物がすくなく、有機物が不足する環境が形成されたものと考えられた。

以上、水田土壌の硝酸態窒素除去速度を検討するための添加有機物を検討したものの、実験条件に適した添加有機物を見いだすことはできなかった。

(4) 水中の藻菌等が硝酸態窒素除去に及ぼす影響

水田土壌がない実験区では硝酸態窒素除去速度はほぼゼロであったのに対して、水田模型の土壌表面に藻類の定着が確認された試験区では、土壌があり、藻類の定着がない試験区より大きな硝酸態窒素除去速度を示した。このことから、水中の藻菌による窒素除去は少なく、土壌表面に定着する藻類により窒素の固定が行われていることが示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 松井宏之, 木下拓也, 杉崎芽依, 大澤和敏	4. 巻 75
2. 論文標題 湛水土壤における硝酸態窒素除去量の推定式および温度・蒸発が与える影響	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1 (水工学)	6. 最初と最後の頁 I_361-366
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 本田耕太郎, 松井宏之, 大澤和敏
2. 発表標題 田川中流域を対象とした窒素循環・作物成長モデルの開発
3. 学会等名 農業農村工学会関東支部大会講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松井宏之
2. 発表標題 湛水土壤の硝酸除去機能の検討に向けた添加有機物の検討
3. 学会等名 農業農村工学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大島 翼, 松井 宏之, 大澤 和敏
2. 発表標題 田川中流域を事例とした水田の施肥量節減に関するモデル解析
3. 学会等名 農業農村工学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小幡尚貴, 松井宏之, 大澤和敏
2. 発表標題 湛水土壤の硝酸除去機能の検討に向けた添加有機物の検討
3. 学会等名 農業農村工学会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------