

平成21年 6月 10日現在

研究種目：基盤研究（C）  
研究期間：2007～2008  
課題番号：19580275  
研究課題名（和文）社会の持続的発展を目的とした農地環境基盤の強化とその利用に伴い水質保全機能の解明  
研究課題名（英文）On Nitrogen Removal in a New Multi-Purpose Paddy Field: Theory and Practice  
研究代表者  
石川 雅也（ISHIKAWA MASAYA）  
山形大学・農学部・准教授  
研究者番号：30313068

研究成果の概要：食料の安定供給農地および水質環境保全農地として閉鎖型構造を有した汎用化水田に着目し、当農地の使用を前提として、その基礎的知見の蓄積を目的として、野外埋設型ライシメータによる長期野外栽培試験と恒温室での室内実験を行った結果、本研究が想定する新型の汎用化水田構造を有した転換畑地では、肥料成分の浸透流失による地下水汚染を防止できることが明確になった。その前提要件として、心土層での生物学的脱窒能を高めるような水管理が必要であることを示した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学・農業土木学・農村計画学

キーワード：農地整備、環境浄化

## 1. 研究開始当初の背景

近年、地球環境および国土環境の保全が大きな問題となる中、地球の陸地面積の1/3を占める農地について、その国土保全機能の評価と強化が重要な課題となっている。一方で、集水域での無機態窒素（硝酸態窒素）による水質悪化がわが国だけでなく、地球規模で現在でも進行しているが、農地（特に多肥集約型畑地（樹園地））はその水質悪化の大きな面源となっている。そこで、農地からの窒素排出負荷量の低減に対する方策とその強化策の適用が緊急に必要なになっている。

研究代表者は、水田に関する一連の研究課題によって得た知見から、生物学的脱窒作用を直接的な硝酸態窒素除去の方法として着

目し、その窒素流出メカニズムの解明を試みることで、農地1筆単位からの硝酸態窒素の排出負荷量を制御する方策を探った（平成15年度～平成18年度）。

農地下での地下水層帯での脱窒の有無を明確にするため、その特徴が再現されやすい扇状地で調査を行い、畑地から水田への土地利用連鎖系における地下水の水質変動の実態を把握するとともに、冬期の非灌漑状態における水田心土層内の地下水層帯での硝酸態窒素除去の主因が生物学的脱窒であることを明らかにした（平成15年度）。湛水土壌系における表面水滞留中での脱窒作用との大きな違いは、水温によってその脱窒活性を不活性化させる冬期でも、地下水層帯では地

温と水温が脱窒菌の活性水温状態で安定しているため、地下水層帯では硝酸態窒素除去が顕著に行われていたことである。この研究結果から、農地の心土層に還元層を人為的に創出することによって、周年にわたる生物学的脱窒作用が発現できるのではないかと着想し、その条件を満たす農地として新しい農地構造を有した汎用化水田に着目し、野外ライシメータ試験を行った結果、健全な作物生育範囲内での炭素量投入条件のもと、窒素除去率が72%となり、高い数値で地下水層帯における全窒素除去が認められた(平成16年度～平成17年度)。その除去の主因である脱窒菌種は、湛水土壌系での優占種(易分解性有機物を利用する従属栄養微生物)よりはむしろ、硫黄酸化細菌(CO<sub>2</sub>を利用する独立栄養微生物)が優占種である可能性が示唆された(平成17年度～平成18年度)。新しい農地構造を有した汎用化水田を転換畑利用した際、心土層を人為的に強還元状態にすることによって窒素の系外への流出改善を試みた事例は研究代表者による試験の他には存在しない。また、こうした基盤構造を有した農地は世界には現存しない。

## 2. 研究の目的

本研究では水田の水質浄化機能を多肥集約型畑地(樹園地)に活用し、高品質な農作物を安定供給しつつ、その水質浄化機能の強化方法を提案し、その条件を満たす農地として汎用化水田に着目した。本研究では、汎用化水田とは『水田と畑地の区別が無く、耕作者が作付け農作物を自由かつ永続的に選択可能な農地』と定義する。本研究では2つの研究目的を掲げる。

(1) 転換畑土層内 T-N 濃度の予測式の導出とその適用：多肥集約型畑作物の高品質と安定供給を目指した栽培試験を長期にわたって行うとともに、地下水層帯における水質変動と土壌水分変動の実態を精密に観測し、水質水文学的な解析を行う。具体的には、土壌物理学的視点から、転換畑地の心土層内の地下水層帯における脱窒能力の確認、および T-N 濃度予測式の導出とその検証を行った。

(2) 転換畑地心土層 T-N 濃度変動要因の土壌化学的視点による解明：各種条件下での地下水層帯での脱窒量を明確にし、その水質保全機能の強化策を探る。具体的には、土壌化学的視点から、転換畑地下層の飽和土層での脱窒量について、化学量式を用いて算出した。飽和土層の最上位層を弱還元層と定義し、T-N 減少量を求め、算出した脱窒量と比較し、飽和土層中の弱還元土層の割合を推定した。

上記の互いに関連している研究を行うことで、『土地資源の適切な活用に資する知見』と『面源での水質環境保全策の強化方法』を具体的に明示した。

## 3. 研究の方法

(1) 転換畑土層内 T-N 濃度の予測式の導出とその適用

### ① 野外試験

試験は隣接したライシメータ3基を用いて行い、施肥方法に応じて有機肥料区、化学肥料区、無施肥区とした。有機肥料区と化学肥料区では2007年の春と秋にホウレン草を栽培した。

有機肥料区には、2007年4月11日、2007年8月6日に、山形県鶴岡市の篤農家をモデルとして、牛糞完熟堆肥5kg、自家製発酵肥料0.6kg、マドラグアノ(リン系)0.4kg、法線有機(窒素系)0.9kgを作土層にすき込んだ。

化学肥料区には、山形県の施肥基準に従い、2007年5月11日に硫酸120g(74kgN/ha)、過リン酸石灰40g、硫酸カリウム40gを施肥した。2007年9月24日に硫酸240g(157kgN/ha)、過リン酸石灰40g、硫酸カリウム40gを施肥した。

2007年8月6日には、化学肥料区の心土層に硝酸カリウム324g(140kg/ha)を投入し、窒素除去試験を行った。

試験期間の2007年4月17日～同年7月31日、2007年8月21日～同年10月30日は隔週定刻に、2007年8月7日～同年8月16日は24時間間隔で地表下10cm毎の土層の暗渠から土壌水を採取し、18項目の水質を分析した。

### ② 室内実験

土壌の窒素除去能力を求めるため、恒温暗室条件下で窒素除去試験を行った。ライシメータの心土層土壌を、圃場と同じ湿潤密度で500mLビーカーに深さ5cmで充填し、各種濃度設定したKNO<sub>3</sub>溶液を湛水させた。42日間の長期試験と8日間の短期試験を行い、表面水のT-N濃度とTOC濃度の経時変動を計測した。

(2) 転換畑地心土層 T-N 濃度変動要因の土壌化学的視点による解明

### ① 野外試験

試験は隣接したライシメータ2基を用いて行い、施肥方法に応じて化学肥料区、無施肥区とした。化学肥料区では2008年の春と秋にホウレン草を栽培した。

化学肥料区では、試験開始時に心土層に硝酸カリウム277kg・N/haを心土層に投与した。これは冬季における最大脱窒量を測定するためである。福島県の施肥基準に従い、2008年5月27日と2008年9月24日に硫酸236kg・N/haを施肥し、ホウレン草を栽培した。

2007年12月10日～2009年1月26日の毎週定刻に地表下10cm毎の土層の暗渠から土壌水を採取し、18項目の水質を分析した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 転換畑土層内 T-N 濃度の予測式の導出とその適用

###### ① T-N・NO<sub>3</sub>-N 濃度変動 (Fig.1)

全試料で、T-N 濃度≒NO<sub>3</sub>-N 濃度であった。有機肥料区では各土層で 0.317~36.7mg/L の範囲で推移した。試験開始時や施肥後に濃度が高まるが、6 週間後には森林での渓流水濃度程度である 1mg/L 以下まで全層で低下した。

化学肥料区では試験期間のほとんどで 10mg/L 以下で推移し、最終的に森林での渓流水濃度程度である 1mg/L 以下まで低下した。

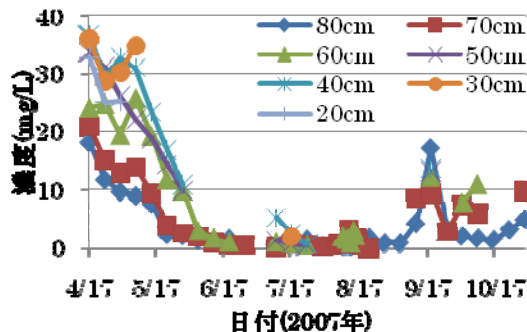


Fig.1 T-N 濃度変動 (有機肥料区)

###### ② 収支法と積算法による脱窒量の算出

野外試験における脱窒量を、収支法と積算法から算出した。収支法について説明する。

ライシメータは完全閉鎖系である。そのため、窒素が系外に持ち出される要因は脱窒と作物収穫のみであるので、収支法から求められる脱窒量を  $D_1$  とすると、 $D_1$  は以下の式で表される。

$$AX_1 - BX_2 - (C_{soil} + C_{water}) - E_{biomass} = D_1$$

AX<sub>1</sub>: 投入窒素量 C: ライシメータに残存した無機窒素  
BX<sub>2</sub>: 作物吸収量 E: 土壌中の有機態窒素保持量

次に積算法について説明する。積算法では、暗渠水の採取間隔毎の脱窒量を積算し、脱窒量を求めた。積算法によって求められる脱窒量を  $D_2$  とすると、 $D_2$  は以下の式で表される。

$$\int L(C_0 - C)dt = D_2$$

L: 地下水量 C<sub>0</sub>: 前回採水時の硝酸態窒素濃度  
C: 今回の硝酸態窒素濃度

収支法と積算法で求めた脱窒量  $D_1$  と  $D_2$  を比較すると、化学肥料区以外では  $D_1$  と  $D_2$  が大きく異なっていたため、暗渠水の硝酸態窒素濃度の減少要因は脱窒のみではないと推察される。

そこで、室内実験を行い、全窒素濃度の予測式の導出を試みた。

###### ③ T-N 濃度予測式の導出

硝酸態窒素濃度の時間変化に関する理論式を、以下のように仮定した。

$$f(c, x) = \frac{dc}{dx}$$

C: 硝酸態窒素濃度(mg/L) X: 日数

硝酸態窒素の初期濃度を  $C_0$ 、硝酸態窒素濃度の時間変化率を  $A$  とすると、 $C/C_0=A$  と表せる。本試験では室温 30℃、初期硝酸態窒素濃度 100mg/L に設定した長期室内実験より、 $A = 0.9489^x$  を得た。

脱窒は硝酸態窒素濃度と水温によって制限されることが知られている。そこで、 $A$  を求めた環境を標準状態として、 $A$  を一般化して  $A^*$  を求める式を以下のように仮定した。

$$A^* = 0.9489^x \times \alpha \times \beta$$

$\alpha$  は水温に依存して変動するパラメータ、 $\beta$  は硝酸態窒素濃度の初期濃度に依存して変動するパラメータである。 $\alpha$  を求めるために、室温を 0℃、15℃ に変えた短期室内実験を行った。また、 $\beta$  を求めるために初期硝酸態窒素濃度を 100mg/L、200mg/L、400mg/L に変えた短期室内実験を行った。その結果、室温の上昇に比例して除去率が高まる傾向が認められ、 $\alpha = 0.9786e^{-0.001t}$  を得た。しかし、初期濃度の変動による窒素除去率への影響は特に認められなかったため、 $\beta=1$  とした。

###### ④ T-N 濃度予測式の検証

各測定日の T-N 濃度実測値から T-N 存在量を算出し、T-N 存在量のピーク値について、導出した濃度予測式を適用させて、実測値から求めた T-N 存在量の推移と比較した (Fig.2)。有機肥料区では、理論値のほうが急な減少となった。化学肥料区では、サンプリングを毎日行った期間で精度の高い一致が認められた。

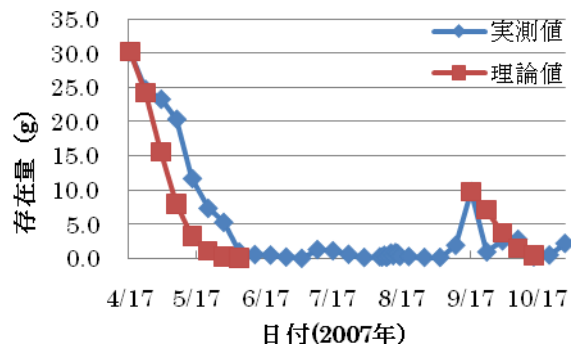


Fig.2 有機肥料区における理論値と実測値の比較

(2) 転換畑地心土層 T-N 濃度変動要因の土壌化学的視点による解明

① 野外試験 T-N・NO<sub>3</sub>-N 濃度変動(Fig.3)

全試料で、T-N 濃度≒NO<sub>3</sub>-N 濃度であった。化学肥料区では、硝酸カリウム投与直後に非常に高い濃度となった。その後、濃度は減少し、約 11 ヶ月後の 2008 年 11 月 10 日には 1.5mg/L まで減少した。無施肥区は、試験期間のほとんどで 1.0mg/L 以下で推移した。

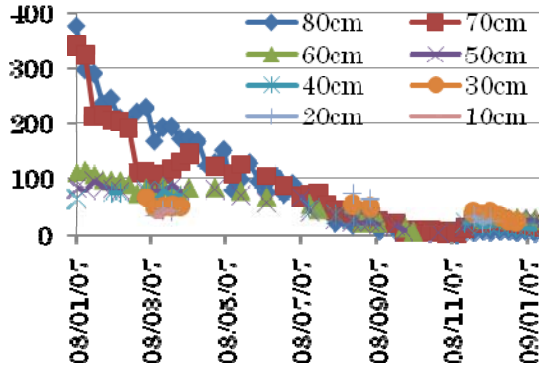


Fig.3 T-N 濃度変動 (化学肥料区)

② 窒素収支 (Fig.4)

化学肥料区における脱窒量を、脱窒反応の化学量式から求めると、従属栄養型脱窒菌の脱窒量は 29.9kg・N/ha となった。また、独立栄養型脱窒菌の脱窒量を求めると、657kg・N/ha となった。投入窒素量は 747kg・N/ha であり、投入窒素量の 88%が独立栄養型脱窒菌により除去された。また、12~3月も 200kg・N/ha の脱窒量が算出され、冬季も活発に脱窒反応が生じていることが示唆された。

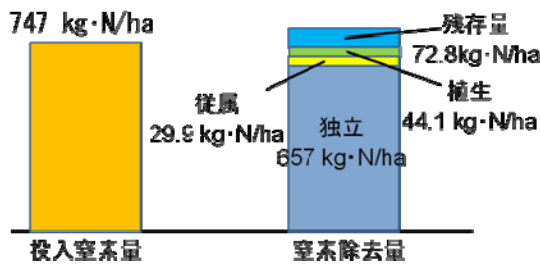


Fig.4 窒素収支 (化学肥料区)

③ 弱還元層の推定

飽和土層のうち、最上位の 10cm 層を弱還元層と定義し、それよりも下層を強還元層と定義した。その上で、弱還元層と強還元層のそれぞれで T-N 減少量を積算し、弱還元層の積算値を従属栄養型脱窒量とし、強還元層の積算値を独立栄養型脱窒量とした。弱還元層の定義を 20、30cm と定義した場合についても算出した。

④ T-N 減少量の算出方法

T-N 減少量の算出方法は、① 採水日間で水位変動がなかった場合、② 採水日間で水

位が低下した場合、③ 採水日間で水位が上昇した場合の、3 つの場合に分けられる。X 週の土層 A、土層 B、土層 C (上層から A、B、C) の T-N 存在量を A0、B0、C0 とした。また、X+1 週の土層 A、土層 B、土層 C の T-N 存在量を A1、B1、C1 とした。飽和層の最上位層の T-N 存在量=土層体積(V)×体積含水率(Pw)×土層 T-N 濃度(C)とし、それ以下の土層の T-N 存在量=土層体積(V)×間隙率(Pv)×T-N 濃度(C)とした。

① 水位変動がなかった場合

土層 A まで飽和している状況が続いた場合は以下のように計算した。

弱還元層の T-N 減少量 a (g)

$$= A0 - A1$$

$$= V \times Pw \cdot a / 100 \times (CA0 - CA1)$$

Pw-a : 土層 A の体積含水率(%)  
CA0 : X 週の A 層の T-N 濃度(mg/L)  
CA1 : X+1 週の A 層の T-N 濃度(mg/L)

強還元層の T-N 減少量 β (g)

$$= (B0 - B1) + (C0 - C1)$$

$$= V / 100 \times \{Pv \cdot b \times (CB0 - CB1)\}$$

$$- \{Pv \cdot c \times (CC0 - CC1)\}$$

Pv-b : 土層 B の間隙率(%)  
CB0 : X 週の B 層の T-N 濃度(mg/L)  
CB1 : X+1 週の B 層の T-N 濃度(mg/L)  
Pv-c : 土層 C の間隙率(%)  
CC0 : X 週の C 層の T-N 濃度(mg/L)

② 採水日間で水位が低下した場合

水位が土層 A から土層 B に減少した場合は以下のように求めた。

弱還元層の T-N 減少量 a (g)

$$= B0 - B1$$

$$= V / 100 \times \{(Pv \cdot b \times CB0) - (Pw \cdot b \times CB1)\}$$

Pv-b : 土層 B の間隙率(%)  
Pw-b : 土層 B の体積含水率(%)  
CB0 : X 週の A 層の T-N 濃度(mg/L)  
CB1 : X+1 週の A 層の T-N 濃度(mg/L)

強還元層の脱窒量 β (g)

$$= C0 - C1$$

$$= (V \times Pv \cdot d / 100 \times CC0) - (V \times Pv \cdot d / 100 \times CC1)$$

Pv-c : 土層 C の間隙率(%)  
CC0 : X 週の C 層の T-N 濃度(mg/L)  
CC1 : X+1 週の C 層の T-N 濃度(mg/L)

③ 採水日間で水位が上昇した場合

水位が土層 B から土層 A に上昇した場合は以下のように求めた。不飽和である X 週の A 層の T-N 存在量は、前採水日と同量と仮定した。

弱還元土層の T-N 減少量 a (g)

$$= A0 - A1$$

$$= A0 - (V \times Pw \cdot a / 100 \times CA1)$$

Pw-a : 土層 A の体積含水率(%)  
CA1 : X+1 週の A 層の T-N 濃度(mg/L)

$$\begin{aligned} & \text{強還元層の T-N 減少量 } \beta(\text{g}) \\ & = (B_0 - B_1) + (C_0 - C_1) \\ & = V/100 \times \{ (P_w \cdot b \times C_{B_0}) - (P_v \cdot b \times C_{B_1}) \} \\ & \quad - \{ P_v \cdot c \times (C_{C_0} - C_{C_1}) \} \end{aligned}$$

$P_w \cdot b$ : 土層 B の体積含水率(%)  
 $P_v \cdot b$ : 土層 B の間隙率(%)  
 $C_{B_0}$ : X 週の B 層の T-N 濃度(mg/L)  
 $C_{B_1}$ : X+1 週の B 層の T-N 濃度(mg/L)  
 $P_v \cdot c$ : 土層 C の間隙率(%)  
 $C_{C_0}$ : X 週の C 層の T-N 濃度(mg/L)  
 $C_{C_1}$ : X+1 週の C 層の T-N 濃度(mg/L)

#### ⑤ 弱還元土層厚の推定

弱還元層の定義を 10cm とした場合、T-N 減少量から算出した従属栄養型脱窒量は 200kg・N/ha となり、20cm とした場合は 398kg・N/ha となった。ここから、弱還元土層厚 1cm 当りの T-N 減少量は 20.0kg・N/ha となる。

化学量式から求めた脱窒量 29.9kg・N/ha に相当する弱還元土層の厚さは 1.49cm となる。弱還元層の定義を 10cm とした場合、T-N 減少量から算出した独立栄養型脱窒量は 821kg・N/ha となり、20cm とした場合は 614kg・N/ha となった。化学量式から求めた脱窒量 657kg・N/ha に相当する弱還元土層の厚さは 18.0cm となる。この差異の原因には、易分解性有機物が不足し、従属栄養型脱窒菌の活性が低かったことが考えられる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

(現在、4 報の学術論文を投稿準備中)

[学会発表] (計 5 件)

- ① 下田陽介、石川雅也、塩沢昌、転換畑土層内 T-N 濃度の予測式の導出と適用、農業農村工学会、平成 20 年 8 月 27 日、秋田県立大学
- ② 長谷川晃彦、下田陽介、石川雅也、飯田俊彰、梶原晶彦、閉鎖型汎用化水田構造を有した転換畑地からの温室効果ガス削減方法、農業農村工学会、平成 20 年 8 月 27 日、秋田県立大学
- ③ 下田陽介、石川雅也、梶原晶彦、転換畑における心土層内 T-N 濃度減少の予測式の導出と適用、日本土壤肥料学会東北支部、平成 20 年 7 月 2 日、戦災復興記念館 (仙台市)
- ④ 紺野繁夫、石川雅也、塩沢昌、転換畑有機野菜栽培下における土層内窒素除去量に関わる理論式の適用、農業土木学会、平成 19 年 8 月 30 日、島根大学
- ⑤ 下田陽介、石川雅也、飯田俊彰、梶原晶彦、転換畑野菜栽培下における化学量式を用

いた脱窒量の算出、農業土木学会、平成 19 年 8 月 30 日、島根大学

[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]

ホームページ等

<http://www.tr.yamagata-u.ac.jp/zensen/shikawa%20lab.pdf>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

石川 雅也 (ISHIKAWA MASAYA)  
 山形大学・農学部・准教授  
 研究者番号: 30313068

##### (2) 研究分担者

なし

##### (3) 連携研究者

なし

##### (4) 研究協力者

なし