

地下水と土を育む農業を支える試験研究

## 第 2 期 結 果 報 告 書

(令和 2 年度～令和 6 年度)

令和 7 年度

熊 本 県

# 目次

ページ

## 1. はじめに

- 1-1 試験の背景 1
- 1-2 第1期の試験の振りかえり 2
- 1-3 第2期の試験概要について 3

## 2. 試験の結果

- 2-1 硝酸態窒素問題の現状：改善点と課題点 4  
熊本大学 大学院先端科学研究部 細野 高啓 教授
- 2-2 飼料イネ栽培での珪鉄資材施用と窒素除去 11  
熊本県立大学 環境共生学部 松添 直隆 教授
- 2-3 カラム試験による水田土壌からの無機態窒素  
の溶出量の評価 18  
熊本県立大学 環境共生学部 小林 淳 教授
- 2-4 水田の湛水による地下水涵養 23  
東海大学 文理融合学部 天野 弘基 助教

## 3. 試験の取りまとめ 28

## 4. さいごに 29

# 1. はじめに

## 1-1 試験の背景

熊本県では、本県の宝である地下水と土を50年先100年先の未来に引き継ぐため、平成27年3月に「地下水と土を育む農業推進条例」（以下、条例といいます。）を制定しました。この条例の第14条において、地下水と土を育む農業の発展及び効果的な推進を図るため、地下水と土を育む農業に関する技術開発及び調査研究、技術の普及指導、情報の提供その他の必要な施策を講じることとなっています。

土壌は、農業を営むうえで基盤となる要素です。本県では健全な土壌を育むため、全国に先駆けて、平成2年度に「土づくり・減農薬運動」を展開し、平成17年度からは土づくりを基本に減農薬・減化学肥料で環境に配慮した「くまもとグリーン農業」に名称を改め、現在も取り組んでいます。

国も令和3年に「みどりの食料システム戦略」を公表し、持続可能な農業の実現に向け、2050年までに化学肥料を30%低減（平成28年比）、化学農薬を50%低減（令和元年比）するなどの目標を掲げており、本県としてもくまもとグリーン農業の更なる推進が必要となっています。

また、豊富な地下水に恵まれた本県は、生活用水の約80%を地下水で賄っています。特に熊本地域ではほぼ100%が地下水で賄われています。この地下水に支えられ、農業では多様な農産物を生み出しています。一方で、稲作による水田湛水等によって、地下へ浸透した水が新たな地下水を育み、県民の生活を潤すなど、農業もまた地下水保全に寄与し、地下水と農業は密接に関係しています。こうした点を踏まえ、本県では地下水を育む活動として、民間企業からの寄付や行政から負担金などを活用し、平成16年度から農業者の協力のもと水田湛水事業が継続されています。

このように、農業生産を通じた地下水と土の保全に取り組んできましたが、その活動を科学的知見に基づいて進めていくことで、より効果的なものとしていく必要があります。そこで、県内の大学に委託して、平成27年から令和元年度までを第1期、令和2年度から令和6年度までを第2期として、地下水と土を育む農業を支える調査研究を実施しました。今回は、第1期を振り返りつつ、第2期の結果をご報告します。

## 1-2 第1期の試験の振りかえり

第1期では、地下水の「質」に関して3課題、地下水の「量」に関して1課題に組みました。

### 【地下水の質に関する研究の結果】

#### ①農業由来の環境負荷の原因である硝酸性窒素の地下への動態について

- ・畑地における硝酸性窒素の地下への浸透速度は、基本的に水と同様で、約2m/年であり、地下水に到達するまでに数年から数十年を要する。
- ・地下水中の硝酸性窒素濃度は、化学肥料からの溶出で高まるが、有機質肥料の使用や施肥管理によって、硝酸性窒素濃度を低減できる可能性を示唆。

#### ②飼料用米栽培における水田から河川水中への窒素負荷について

- ・近年生産拡大を図る飼料用米は、主食用米より多肥で、耕畜連携により有機質肥料（堆肥等）の施用が増加しているが、河川や地下水への窒素負荷量が顕著に高くなることはないことを確認。

#### ③飼料用米栽培による水質浄化機能について

- ・飼料用米作付け水田からの流出窒素量は、施肥等による投入窒素量の2%程度にとどまり、飼料用米栽培も主食用米栽培と同様に高い水質浄化作用があることを確認。

### 【地下水の量に関する研究の結果】

#### ①水田湛水が地下水の量に及ぼす効果について

- ・熊本地域、菊池・鹿本地域、阿蘇地域の水田における地下水の年間かん養量を解明。特に白川中流域の水田の地下水涵養量が多い。

以上のように、第1期の結果、硝酸性窒素の地下への浸透速度が解明でき、有機質肥料や施肥方法によって窒素負荷低減を図れること、近年推進している飼料用米栽培は高い水質浄化機能を有すること、そして県北地域の水田が地下水涵養に大きく貢献していることが分かりました。

## 1-3 第2期の試験概要について

第1期の結果を受けて、第2期では以下に取り組みました。

### 【地下水の質に関する研究】

硝酸性窒素の地下へのおおよその浸透速度が判明しましたので、過去に施用された肥料由来の窒素及び家畜由来の窒素が、現在の地下水にどのくらい影響しているのかを解明し、これまでの硝酸性窒素削減の取組みの効果を評価するとともに今後への課題を抽出し、加えて、これらの解析データを基に将来予測等ができる窒素動態モデルの構築にも着手するため、熊本大学の細野高啓教授に委託し、研究を行いました。

また、地下水涵養のために水田湛水の取組みを広げていますが、水田湛水によって水田土壌中の窒素成分がどの程度溶出するかが分かっていません。そこで、湛水した水田土壌中に含まれる窒素量のうち、土質や温度などの違いによって、どれだけの量が溶脱するのか評価するため、熊本県立大学の小林淳准教授（現教授）に委託し、調査を実施しました。

さらに、近年の作付けを推進してきた飼料用米の高い水質浄化機能が判明しましたが、面積が拡大したことにより、窒素溶脱をさらに低減する技術の検討が必要であるため、熊本県立大学の松添直隆教授に委託し、調査を実施しました。

### 【地下水の量に関する研究】

熊本県内全域の地下水涵養量の解明に向け、これまでに評価されていない玉名地域および八代地域（宇城市を含む）及び球磨地域の水田において地下への水の浸透量を測定するため、東海大学の天野弘助教授に委託し、調査を実施しました。

## 2. 試験の結果

### 2-1 硝酸性窒素問題の現状：改善点と課題点

熊本大学 大学院先端科学研究部 細野 高啓 教授

#### 1. 試験の目的

熊本地域において問題となっている地下水中の硝酸性窒素の濃度上昇は、主として平野周辺台地部において、作物によって吸収されなかった農業・畜産由来の窒素成分が時間をかけて帯水層に侵入する形で進行していることが分かっています。第一期の試験研究では「硝酸性窒素の地下への浸透動態」と題し、それまで分かっていたいなかった不飽和帯中の水の浸透速度および農地から負荷される窒素成分の下方運搬の実態について、定量的な解析を通じ明らかにしました。

不飽和帯において下方運搬された窒素成分はおおよそ数年から 25 年程度の時間をかけ帯水層に辿り着き (Okumura et al., 2018)、やがて地下水中の硝酸性窒素濃度の上昇に寄与していきます。熊本地域での硝酸性窒素濃度の上昇は 1960 年代後半から顕在化しました。その後、1999 年における家畜排せつ物法や環境基準の制定、2005 年からの熊本地域硝酸性窒素削減計画の実行、2015 年の地下水と土を育む農業推進条例の施行など、様々な対策が講じられています。しかし、こうした対策の効果を含めた近年の状況については、地中での水や物質の複雑な動態を踏まえた学術的な検討が必要なため、一般的にはまだあまり知られていません。

そこで、続く第二期の試験研究では現在の地下水中の硝酸性窒素濃度の実態を学術的な手法を用いて読み解き、最近見られる窒素濃度の低減の兆候を初めて明らかにするとともに、新たに浮き彫りにされる課題の抽出を目的といたしました。これらを踏まえ本報告書は「硝酸性窒素問題の現状：改善点と課題点」と題し内容を紹介したいと思います。ここではまず今期試験研究の前年にあたる 2019 年度に著者が行政や水道事業団の方々からの協力を得て収集した網羅的な地下水試料について水質・同位体分析を実施することから始めました。その結果を、その 10 年前に実施した大規模な採水調査の結果 (Hosono et al., 2013) と比較することで、濃度の分布パターンやその供給源 (農業や畜産の別) の特徴、またそれらの変化を見出すことを試みました。

しかし、2009 年と 2019 年の二カ年の比較だけではより連続的な変化を理解しにくいことが予想されます。そこで、更に行政や水道事業団が保有する観測井や水源井における硝酸性窒素濃度の過去データを入手できるものについて全て整理し、最近数年間の年変動傾向を数値化しました。それを分布図に起こせば地域全体で窒素濃度が時空間的にどう変化したかより詳しく理解できます。更には、毎年 5 年ごとに改定される農林業センサスデータに記録されている農業生産量をベースに窒素負荷量を算定し、地下水硝酸性窒素濃度との対応関係を精査しました。これにより窒素負荷削減対策効果を含めた農業活動の強度が地下水の濃度にどう影響を与えてき

たか長期スケールで検討することができます。

以上のように、本報告書では試料分析と行政データ解析を統合し、地下水中の硝酸性窒素問題の現状、最近における改善とその理由、見えてきた課題を整理する形で第二期の試験研究で行った内容を報告したいと思います。加えて、本試験研究期間中に窒素動態を再現するモデル化にも着手しています。取り纏めた分析・解析データはモデルの条件設定および再現性検討の軸ともなります。モデルの構築については続く第三期の試験研究での中心的な事業となりますので、本報告書においては今後目指す窒素動態モデル構築への展望を述べる形で締めくくりたいと思います。

## 2. 試験の方法

2019 年の一斉調査を通し地域全域を対象に合計 243 地点の井戸から分析用の地下水試料を採取しました。そのうち第二帯水層からの地下水が 209 地点と大半を占めます。地点の分布については結果と考察で紹介する図からご確認いただけます。実験室に持ち帰った地下水試料は、イオン濃度についてはイオンクロマトグラフ（メトロノーム社製、Compact IC 761）、硝酸イオン（ $\text{NO}_3^-$ ）の窒素と酸素の安定同位体比（それぞれ  $\delta^{15}\text{N}$  と  $\delta^{18}\text{O}$  と表記します）は同位体質量分析計（Thermo Fisher Scientific 社製 Delta V Advantage）を用いてそれぞれ分析しました。いずれも熊本大学の研究室に設置されている分析装置です。地下水の硝酸イオン中に含まれる窒素の起源推定と脱窒などのプロセス解明には同位体トレーサー法を適応しました。

本研究では国や地域行政ならびに水道事業団が管理している観測井もしくは水源井の長期にわたる硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素濃度（以下硝酸性窒素濃度）の水質検査データを可能な限り収集しました。管轄によって異なり年 1 から年 4 回のペースで検査が実施されています。総地点数は 436 地点ですが、井戸深度が不明な地点が 20 地点ありますので、実際の解析には 416 地点の井戸について検討を行いました。管轄ごとのデータの内訳を表 1 に示します。

### 同位体トレーサー法

物質の出入りのこと、保存則によりそれぞれの和は同じになります。考えられる寄与物質を持つ同位体組成および脱窒による組成変化特性との比較を通して起源やプロセスを推定する方法。

表 1 硝酸性窒素濃度の時系列解析を検討した管轄ごとの井戸本数と内容

	第一帯水層	第二帯水層	深度不明	合計	データ期間
国土交通省	7	14	0	21	1994～2019年
熊本市役所	13	22	0	35	1994～2019年
熊本市上下水道局	4	126	0	130	2001～2019年
熊本県庁	52	100	18	170	1994～2019年
合志市役所	0	30	1	31	2012～2019年
益城町役場	0	17	0	17	1996～2019年
大津菊陽水道企業団	3	28	1	32	1968～2019年

更には、施肥や家畜排せつ物からの窒素負荷量を推定するため、農林業センサスデータを利用しました。農林業センサス調査は1960年から2020年まで5年毎に実施されており、その中の「作物別作付面積」、「家畜等の飼養頭羽数」の項目を使用しました。ここで1990年の両項目と、2010年の野菜類、果樹類の作付面積に関しては調査が行われておらずデータがないため、農家数などの項目から前後のつながりが問題ないことを確認したのち、前後の年のデータを平均して補完しました。窒素負荷量（ここでは地表から地下へ浸透する量と定義します）は、作物吸収や溶脱量、また対策の効果を項目ごとに細かくファクター化し、原単位法に基づき旧市町村行政区画単位で整理しました。

原単位法  
農地や家畜の単位量あたりに発生する推定窒素量を基に単位面積当たりの負荷量を算定する方法。

### 3. 結果と考察

#### ①硝酸イオン濃度と硝酸性窒素の起源に対する分布特徴

地下水中の硝酸イオン濃度の分布特徴は、2009年と2019年に実施したいずれの調査でも類似した傾向が見られました（図1）。両者は検討している観測井戸の位置や数が必ずしも同じではないのですが、いずれも概ね植木、合志、菊池、大津、西原や益城の台地部分で濃度が高く、僅かな地点において硝酸イオン態としての環境基準である50 mg/Lを上回っている結果となっています。一方、台地部から平野にかけて地下水の流れに沿ってしだいに濃度が減衰し、特に平野部では硝酸イオン濃度は2 mg/Lを下回る地点が多く存在します。これは人為起源による影響の無い自然環境で認められる範囲に相当します（図1）。こうした分布特性に対する大局的な特徴は2009年から10年経った後も大きな変化は無いように見えます。

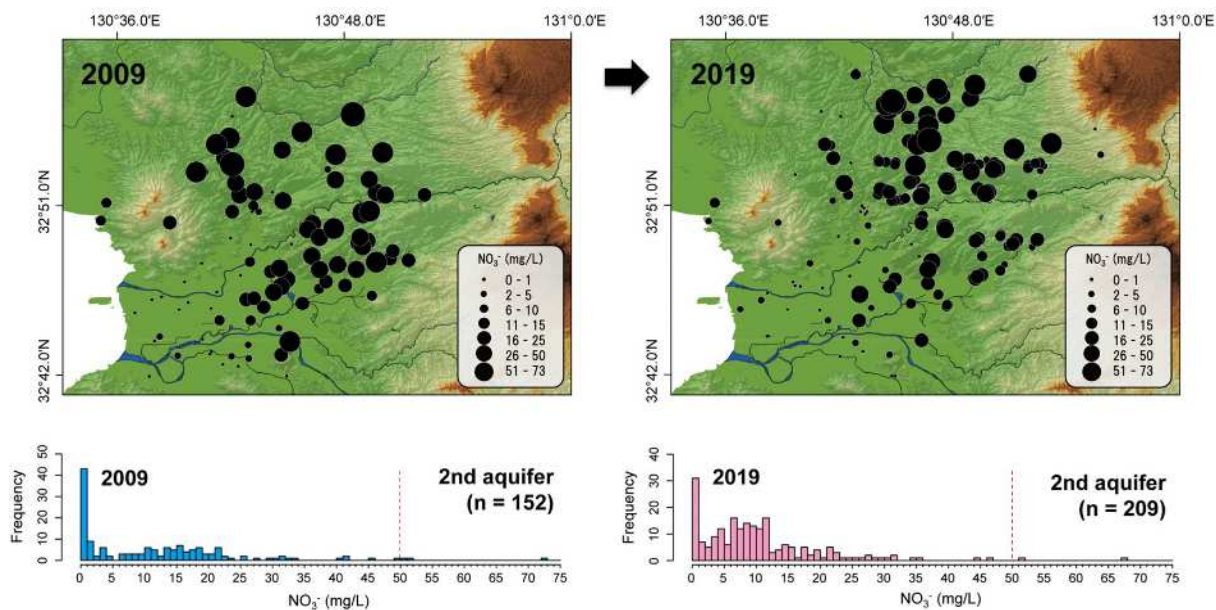


図1 地下水の硝酸イオン濃度の分布

分布図のみからでは2009年と2019年の間での全体的な濃度の変化の特徴を読み取ることが難しいところですが、詳しく見ると植木や西原、また大津の白川低地では濃度レベルが低下してきているようです。頻度分布図で比較をすると（図1の下のグラフ）、2009年では頻度が高い濃度が10 mg/L から22 mg/L 付近にあるのに対し、2019年にはそれより低く3 mg/L から12 mg/L 付近にまとまって存在します。詳細は次の連続的な時間変化に関する項目で述べますが、これは全体として窒素濃度が低減してきた可能性を示唆するのではと推測できます。

一部の地域で回復傾向の兆しが垣間見れますが、台地部分における地下水の硝酸イオン濃度は依然として高い状況にあると言えます。こうした高い硝酸イオン濃度の原因を探るため同位体トレーサー法を適用しました（図2）。それによると、合志、菊陽、菊池、戸島地域などの台地部を中心に、畜産業を通じた家畜の排泄物を由来とする窒素負荷の影響が、2019年の時点で2009年より増して顕著であることが分かりました。その他の台地部分では畑地における肥料由来の窒素負荷の影響も認められます。平野部の大部分では地下水は帯水層中の脱窒による自然浄化作用の働きで窒素濃度が低く保たれている実態も明らかになりました。

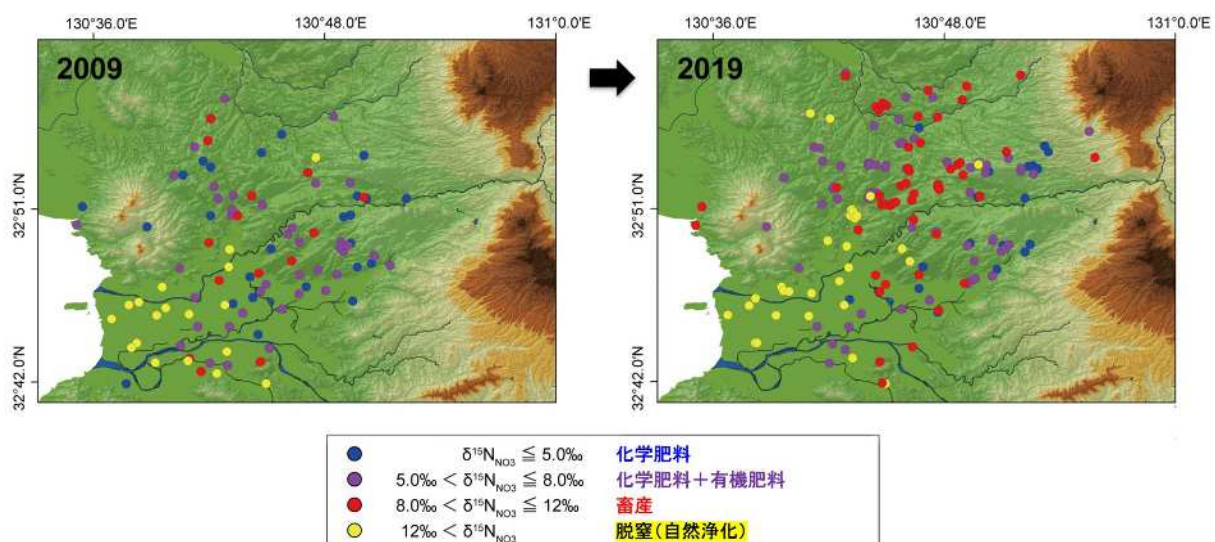


図2 地下水の硝酸性窒素の起源推定

2019年時点で家畜排泄物由来による影響が顕著な地域（図2）は、実際畜産業の規模がピークにあった1990年頃の地表での負荷分布（図3）と良く対応しています。不飽和帯における水や窒素の下方浸透が帯水層へ到達するのに20年前後かかることに鑑みますと（第一期の試験研究の成果より）、当時の影響が時間遅れを伴って現在見られるようになってきたと解釈することができます。以上の通り、窒素濃度や窒素起源に関する分布特徴が随分と良く分かってきました。続いての項目では、こうした濃度分布が今後どう推移するか、長期的な濃度観測や窒素負荷データに基づく解析結果を見ながら探っていこうと思います

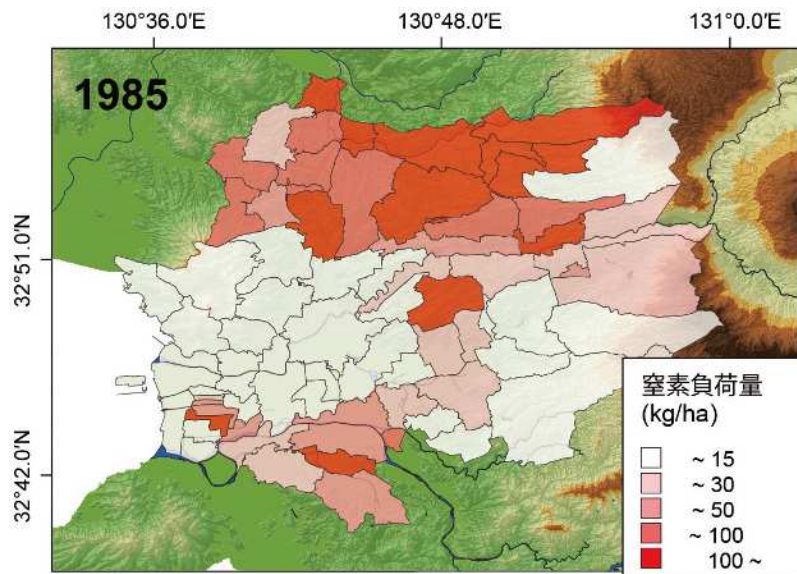


図3 1985年の畜産由来の窒素負荷分布

②見えてきた硝酸性窒素問題の改善点と課題点

図4は網羅的な水質データベースを基に2012年から2019年にかけての各井戸の地下水硝酸性窒素濃度の経年増減傾向を近似直線の傾きで示したものです。図の見方として、暖色系が濃いほど濃度増加が顕著で、寒色系が濃いほど濃度減少が顕著、黄色は顕著な変化がないとして見ていただければと思います。図から、合志、菊陽、菊池、戸島といった家畜の排せつ物に由来する窒素負荷が顕在な地域（図2）を中心に、該当する8年で濃度増加が起こっていること（図4）、また、台地周辺地域では濃度が減少に転じており、特に植木周辺ではその傾向が強いこと、それから、脱窒浄化作用が起こっている平野部では一定して状況は変わらないことが読み取れます。かつて化学肥料による窒素負荷が地下水の窒素汚染を招き心配されていた植木地域では（Hosono et al., 2013）、一部のエリアを残し今では顕著な回復傾向に転じていることが示されています。

窒素負荷量の長期変化パターンを読み解くことで地下水中の窒素濃度の変化要因をより詳しく推察できます。図5は1960年から2020年にかけて全域を対象に農地と畜産のそれぞれからの窒素負荷量の推移を対策が無かった場合（実線）と対策によるファクターを考慮した場合（点線）に分けて示したものです。こ

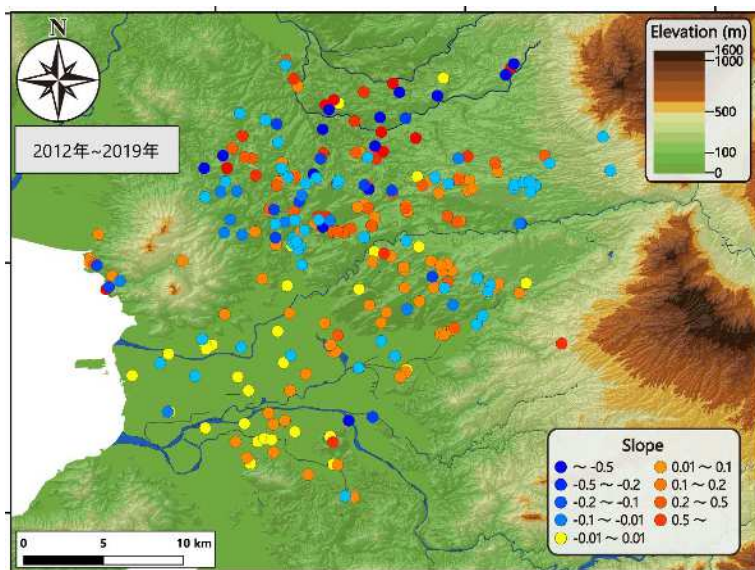


図4 地下水中の硝酸性窒素濃度の増減傾向

れを見ると、農地からの窒素負荷量は 1965 年頃をピークになだらかに減少しています。一方、畜産による窒素負荷量は 1985 年頃まで急増しその後減少に転じています。この結果から、植木を含むかつて畑作が盛んであった台地周辺部における地下水窒素濃度の減少は、第一には農地からの負荷が減少し続けているためだと考えられます。また、合志、菊陽、菊池、戸島およびその流下部でみられる窒素濃度の増加は、1985 年頃ピークを迎えた畜産由来の窒素負荷が、時間をかけこのタイミングでより影響を及ぼし始めているためだと考えられます。

農地からの窒素負荷の低減は、耕作地や農業人口の縮小の他、これまでの対策の効果が働いているものと想定されます（図 5）。したがって、こうした農地由来の地下水硝酸性窒素問題はこの先も改善傾向に向かっていくと予想できます。一方、台地部におけるかつての家畜由来の窒素負荷の影響は今後しばらく続く可能性を想定しておくのが良いでしょう。近年の対策や畜産の縮小の傾向に鑑みますと、この影響は長期的にはいずれ減衰に転じることが予想されますが、今しばらくは本問題を意識し継続的に調査・対応していく必要があると考えられます。最後に重要なこととして、ここまで見てきた全体的な傾向は必ずしも全ての井戸における現象を

精密に説明できるものではありません。数十メートルから数百メートルと近隣同士にある井戸が全く異なる濃度パターンを示すことも多々あります。そのような場合にはよりローカルスケールで個別の解析が必要になると考えられます。

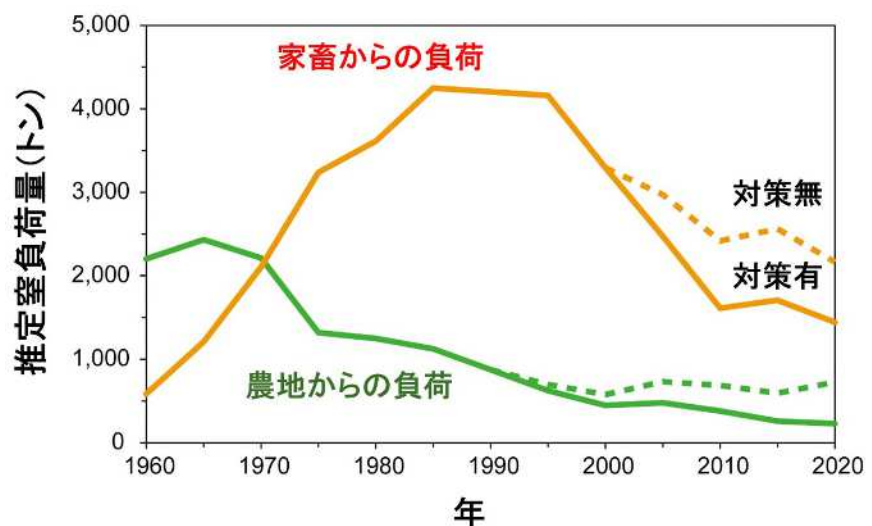


図 5 全域における窒素負荷量の長期変化

#### 4. まとめ

第二期の試験研究を通し、熊本地下水地域の全域における網羅的な採水試料の分析結果ならびに社会データを用いた統計的アプローチを統合し、硝酸性窒素問題に関する最近の現状について改善点と課題点に分けて整理することができました。これらのより詳しい結果は学術雑誌にも掲載致しました (Hosono et al., 2023)。改善点として、農地由来の窒素負荷の低減が地下水中の窒素濃度の減衰に寄与していることが示されました。一方、1985 年頃ピークだった畜産由来の窒素負荷に伴う影響が、今日の窒素濃度の上昇に寄与しており、今後この状態がどう推移するか見定めていく必要があると考えられます。地下水水質の監視と対策を効果的に講じていくため、帯水層中の窒素動態を再現できシナリオベースで将来予測を可能とする地下水流動モデルの活用は有益だと考えられます。

第二期の試験研究の期間中にもこうしたモデルの構築を進めております。すなわち、既往の地下水流動モデル (Rahman et al., 2021) をベースに、本研究で明らか

にした脱窒域の強度やエリアの条件（図 2）ならびに収集した窒素負荷データを入力値とし（図 6）、地下水帯水層中の三次元的な窒素濃度を長期スケールで再現できるモデルを創出すべく細かな条件設定や再現性の確認を進めています。モデルの完成により今後の予想や対策の効果についての量的試算に加え、地下水保全と農業の活性化を両輪で進めていくシナリオ作成に活用できると期待されます。次期の試験研究ではこのことに資する研究活動を推進できれば幸いです。

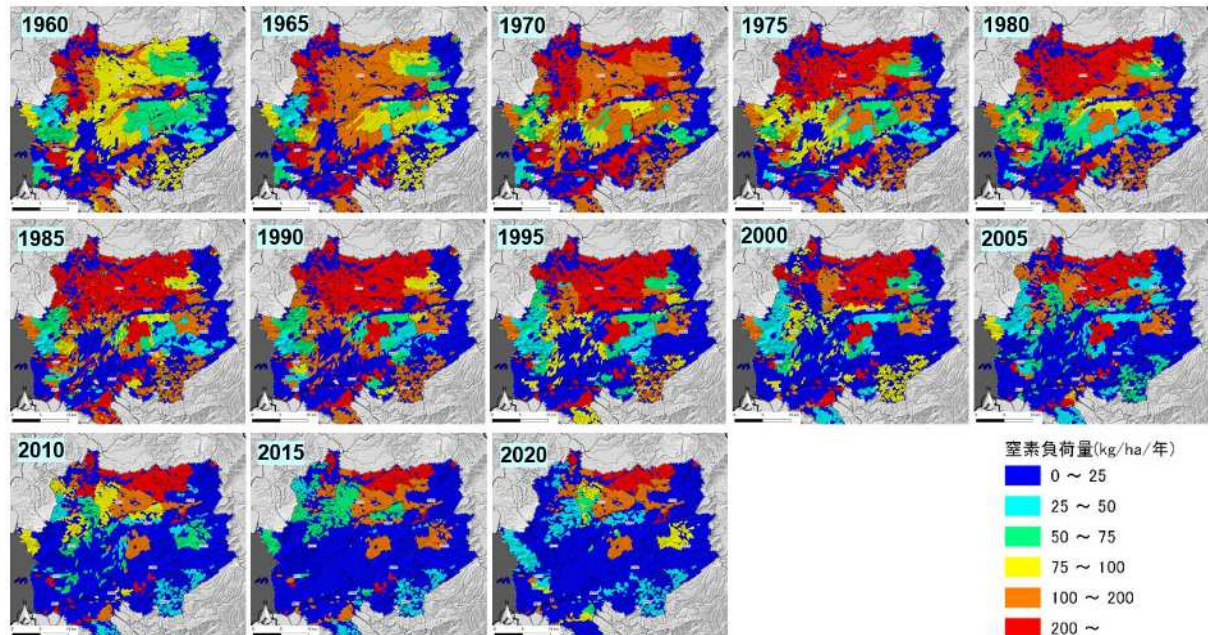


図 6 土地利用に割り当てた窒素負荷量のモデル入力データ

《引用文献》

- Hosono, T., Taniguchi, K., Rahman, A.T.M.S., Yamamoto, T., Takayama, K., Yu, Z.-Q., Aihara, T., Ikehara, T., Amano, H., Tanimizu, M., Nakagawa, K., 2023. Stable N and O isotopic indicators coupled with social data analysis revealed long-term shift in the cause of groundwater nitrate pollution: insights into future water resource management. *Ecological Indicators*, 154, 110670.
- Hosono, T., Tokunaga, T., Kagabu, M., Nakata, H., Orishikida, T., Lin, I-T., Shimada, J., 2013. The use of  $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  tracers with an understanding of groundwater flow dynamics for evaluating the origins and attenuation mechanisms of nitrate pollution. *Water Research*, 47(8), 2661-2675.
- Okumura, A., Hosono, T., Boateng, D., Shimada, J., 2018. Evaluations of the downward velocity of soil water movement in the unsaturated zone in a groundwater recharge area using  $\delta^{18}\text{O}$  tracer: the Kumamoto region, southern Japan. *Geologia Croatia Journal*, 71, 2.
- Rahman, A.T.M.S., Hosono, T., Tawara, Y., Fukuoka, U., Hazart, A., Shimada, J., 2021. Multiple-tracers-aided surface-subsurface hydrological modeling for detailed characterization of regional catchment water dynamics in Kumamoto area, southern Japan. *Hydrogeology Journal*, 29, 1885-1904.

## 2-2 飼料イネ栽培での珪鉄資材施用と窒素除去

熊本県立大学 環境共生学部 松添 直隆 教授

### 1. 試験の目的

地球全体の窒素循環に関する IPCC の報告 (IPCC、2013) では、人間由来の窒素排出が自然の循環を上回り、窒素が蓄積しています (図 1)。土壌中に蓄積された窒素は、硝酸性窒素 (窒素の形態の一部) として地下水に溶け出すことによって、地下水を飲むことによる健康被害が危惧されています。一方、従来からある窒素除去技術は、大規模な処理施設や浄化槽が必要であることから、多くの労力やコストを必要とします。水田には、「水稻による吸収利用」、「土壌による脱窒作用」、「水生植物等による固定」により、灌漑水中の硝酸性窒素を除去する機能があることがわかっています (小川・酒井、1985)。水田の土壌改良資材である珪鉄資材 (水田で利用：鉄、珪酸、石灰を含む) には、脱窒量 (自然の窒素除去の一部) の増加 (Zhang et al.、2019) とイネの窒素吸収量増加 (Song et al.、2017) が期待されます。そこで、本試験では、飼料イネ栽培 (窒素高吸収性の水稻) の窒素除去を把握するとともに、珪鉄施用による窒素除去向上を目的としました。

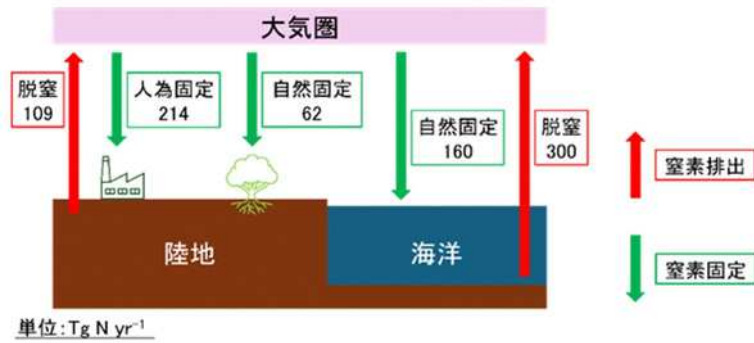
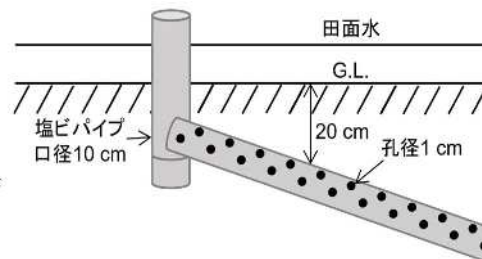
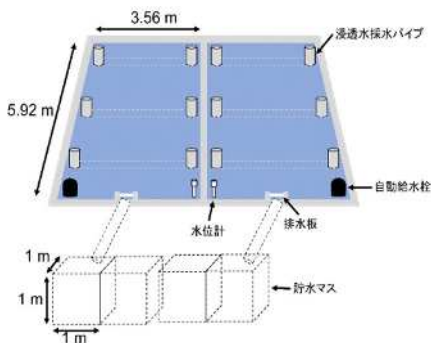


図 1 地球規模における窒素循環 (IPCC の報告 (2013) をもとに作成)

### 2. 試験の方法

#### ①飼料イネ栽培における窒素除去率

飼料イネ水田の窒素除去率を把握するために、熊本県立大学研究圃場内水田 (1 試験区あたり 21.08 m<sup>2</sup> : 水田 A と水田 B の 2 試験区) において (図 2)、飼料用米と WCS (発酵粗飼料) 兼用品種である‘モグモグあおば’を栽培し、栽培期間における水収支\*と窒素収支の調査を行いました。水収支は、流入として降水量、給水量、流出として表面流出量 (排水板を超えた水)、蒸発散量、地下浸透量、その他 (水稻水分量等) としました。また、窒素収支は、流入として降水、給水、肥料、流出とし



\*収支  
物質の出入りのこと、保存則によりそれぞれの和は同じになります。

図 2 水田の模式図 (右図は浸透水採水パイプ)

て表面流出、地下浸透、その他として植物体、不明分（脱窒等）としました。

### ②飼料イネ水田の通年湛水（冬期・夏期）における窒素除去率

飼料イネ水田の通年湛水における窒素除去率を把握するために、①と同様の水田・調査方法により、冬期は飼料イネ植栽なし、夏期は‘モグモグあおば’を植栽し（図3）、湛水期間における水収支と窒素収支の調査を行いました。



図3 湛水期間の水田の様子（左図は冬期湛水、右図は夏期湛水）

### ③飼料イネ水田における珪鉄施用が窒素除去率に与える影響

珪鉄施用が飼料イネ水田の窒素除去率に与える影響を把握するために、①と同様の水田・調査方法により、夏期は‘モグモグあおば’を栽培し、湛水期間における水収支と窒素収支の調査を行いました。珪鉄は、2022年度には1倍量（慣行量：3 t ha<sup>-1</sup>）、2023年度には慣行量の2倍量（6 t ha<sup>-1</sup>）を施用しました。

### ④珪鉄施用が飼料イネの生長量と窒素吸収量に与える影響

珪鉄施用が飼料イネの生長量と窒素吸収量に与える影響を把握するために、1/2000a ワグネルポットを用いて、飼料イネ品種である‘ミナミュタカ’（WCS専用）、‘モグモグあおば’（WCS・飼料用米兼用）、‘ミズホチカラ’（飼料用米専用）、食用品種である‘ヒノヒカリ’を栽培し、植物体のバイオマス量と窒素濃度の調査を行いました。珪鉄は、0倍（無施用）、1倍（慣行量：3 t ha<sup>-1</sup>）、6倍量（18 t ha<sup>-1</sup>）、9倍量（27 t ha<sup>-1</sup>）を施用しました。

### ⑤珪鉄添加が脱窒量に与える影響

珪鉄施用が脱窒量に与える影響を把握するために、培養管を用いて土壌から発生したガス量とガス中の窒素濃度を調査しました（図4）。珪鉄は、0倍量（無添加）、1倍量（慣行量）、3倍量（9 t ha<sup>-1</sup>）、6倍量（18 t ha<sup>-1</sup>）を添加しました。また、珪鉄の影響を把握するため、土壌（矢部・松橋・阿蘇・合志：県農業研究センターより採取）、珪鉄資材（くみあい珪鉄・重焼燐シリカプレミアムII号・重焼燐ミックス）、初期土壌 pH（pH5・6・7・8・9）、添加基質比（C/N\*1.2・1.7・2.3・3.5・5.2・6.9・10.4）の違いによる脱窒量の変化を調査しました。

\*C/N  
炭素と窒素の比の  
ことを表しており、  
C/Nが高いほど、炭素量が多い  
ことを表しております。

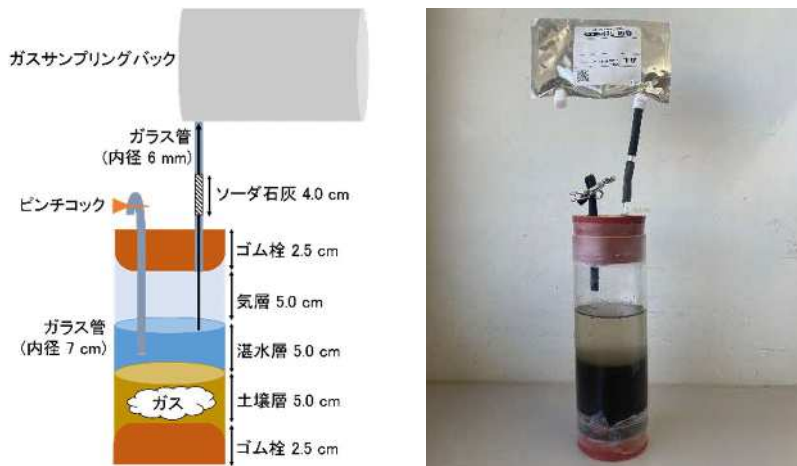


図4 脱窒培養実験（左図は模式図、右図は実物）

### 3. 結果と考察

#### ①飼料イネ栽培における窒素除去（水田 A・B の平均値）

窒素吸収量が食用品種（糟谷・小竹、1997：100 kg N ha<sup>-1</sup>）と比較して約 1.8 倍高くなりました（図5）。飼料イネは水田に植栽することで、水田からの窒素除去に有効であることが示唆されました。また、不明分の窒素は、主に脱窒と窒素固定（大気中の窒素を肥料分として土壤中に固定）と考えられます。そこで、水稲作付期間中の窒素固定を先行研究（小野・古賀、1984）によって求められた 25.8 kg N ha<sup>-1</sup> とすると、脱窒量が 184.8 kg N ha<sup>-1</sup> と試算されます。飼料イネ栽培における窒素除去率\*は 92.1% となり、食用品種（糟谷・小竹、1997：96%）と同様の高い窒素除去率を確認しました。また、飼料イネ栽培の窒素除去の特長として、植物体の窒素吸収量が脱窒と同等、地下浸透水量の減少が挙げられ、飼料イネと脱窒を活用した地下水の窒素除去が可能であることがわかりました。

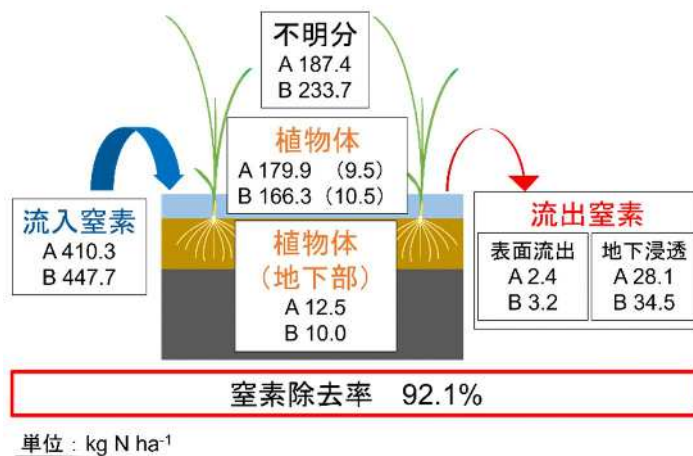


図5 飼料イネ栽培における窒素動態

\*窒素除去率  
全窒素流入量に対する水環境へと流出していない窒素の割合を表しております。この値が高いほど、窒素の流出が低い指標となります。

#### ②飼料イネ水田の通年湛水（冬期・夏期）における窒素除去（水田 A・B の平均値）

冬期湛水では、流入窒素が水田通過により除去され、窒素除去率は 62.3% となりました（図6）。冬期のかけ流し灌漑における窒素除去率は 6.0~9.6% と報告されています（新良・渥美、2007）。本試験の常時湛水による湛水法での窒素除去率が大きいことが確認されました。また、冬期の窒素固定活性が著しく低くなることか

ら（丸山、1976）、不明分は脱窒が大部分を占めていることが示唆されました。

夏期湛水では、「①飼料イネ栽培における窒素除去」と比較して、冬期湛水を行っても地下浸透窒素排出量、窒素除去率に大きな変化がみられませんでした。また、飼料イネの窒素吸収量に悪影響を与えませんでした。窒素除去を最大限に活用するために夏期湛水に加えて、冬期湛水の実施が有効であることが確認されました。

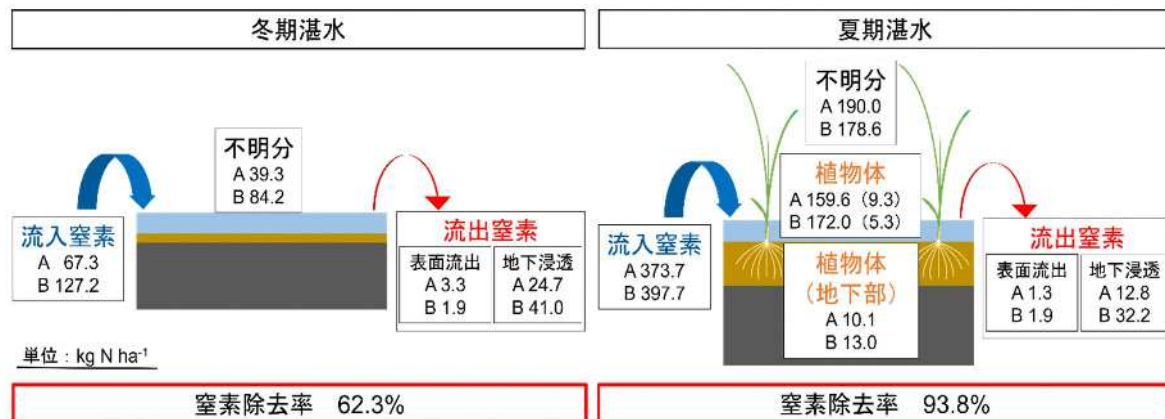


図6 飼料イネ水田の通年湛水による窒素動態

③飼料イネ水田における珪鉄施用が窒素除去率に与える影響（水田 A・B の平均値）

珪鉄1倍量において、飼料イネの窒素吸収量が高くなる傾向にありました（図7）。また、流出窒素は、珪鉄1倍量と比較して珪鉄2倍量で表面流出量、地下浸透量がどちらも増加しました。窒素除去率は、珪鉄1倍量で97.9%、珪鉄2倍量で93.9%になりました。水田土壌に鉄酸化物を添加することで、脱窒菌量の増加と脱窒量の増加が報告されています（Zhang et al., 2019）。また、珪酸の施用は、イネ地上部の乾物生産量の増大、窒素吸収量の増加につながることがわかっています（奥田・高橋、1961）。「②飼料イネ水田の通年湛水（冬期・夏期）における窒素除去」と比較すると、珪鉄を施用することで表面流出、地下浸透による窒素流出量の減少、植物体による窒素吸収量、脱窒量、窒素除去率が増加することが示唆されました。

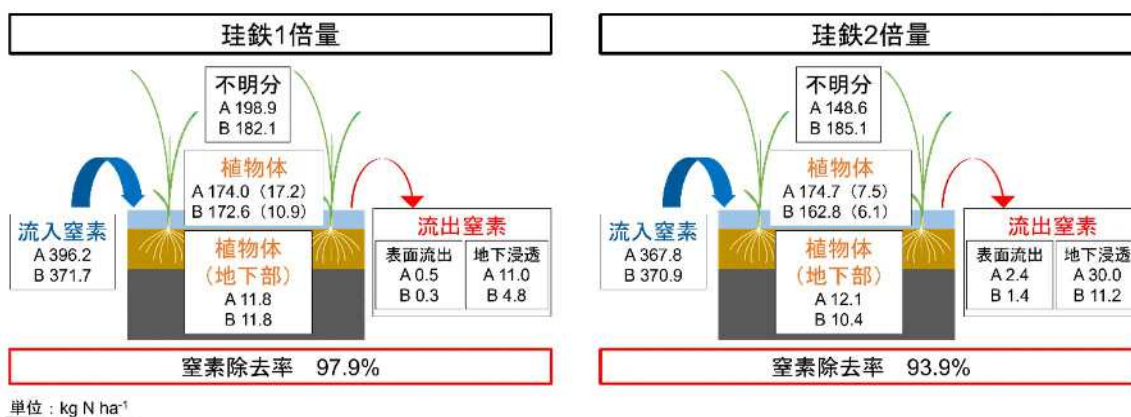


図7 珪鉄施用による飼料イネ水田の窒素動態

#### ④珪鉄施用が飼料イネの生長量と窒素吸収に与える影響

食用品種である‘ヒノヒカリ’は、乾燥重、窒素含量が珪鉄施用により減少しました（図8）。珪鉄施用により、飼料イネ品種である‘ミナミユタカ’は、地下部の乾燥重、窒素含量が減少、‘ミズホチカラ’は、地下部の乾燥重が減少しました。一方、‘モグモグあおば’は、珪鉄施用によりすべての部位の乾燥重、窒素含量が増加しました。‘ヒノヒカリ’は、珪酸含有率の増加による窒素含有率の低下が乾燥重の減少につながることを示唆されました（住田、1962）。‘ミナミユタカ’は、茎葉重の割合が高くなりやすい品種であり、出穂後の下位葉の脱落が乾燥重の増加を抑制した要因であると示唆されました。‘ミズホチカラ’は、茎葉重よりも穂重の割合が高くなりやすい品種であり、登熟期間が出穂後50～60日近く要する品種です。そのため、出穂30日後の収穫では登熟期間が不足していたため、乾燥重が増加しにくいことが示唆されました。‘モグモグあおば’は、茎葉重と穂重どちらも大きくなりやすく、極穂重型の品種です。そのため、出穂に伴う下位葉の葉身から穂への窒素移行が進みやすかったため、珪鉄施用による乾燥重や窒素含量が増加したと推察されました。

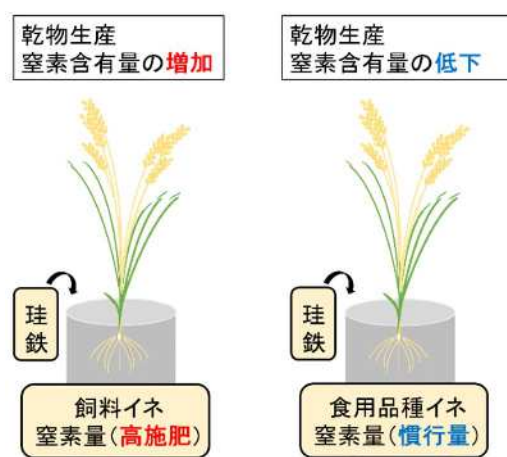


図8 珪鉄によるイネへの影響

#### ⑤珪鉄添加が脱窒量に与える影響

脱窒量は、くみあい珪鉄、重焼燐シリカプレミアムII号では、ほとんどの土壌において添加量が増加するにつれて増加しました（図9）。水田土壌への鉄酸化物の添加により、脱窒菌量と脱窒量が増加することが報告されています。また、石灰には土壌 pH 上昇効果があり、弱アルカリ性の条件において脱窒率が最大になることがわかっています（Focht、1974）。つまり、鉄・石灰濃度が高い珪鉄資材の添加が脱窒量の増加につながることが考えられます。一方、土壌中の炭素含量が高い合志土壌では、珪鉄資材施用による脱窒量が増加しませんでした。

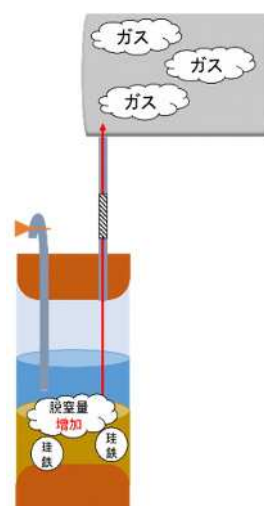


図9 珪鉄による脱窒量への影響

初期土壌 pH 5～7 では、くみあい珪鉄の添加量が増えるにつれて、脱窒量が増加しました。くみあい珪鉄の添加により、土壌 pH の弱アルカリ性側へのシフトによる脱窒率の増加が考えられます。一方、初期土壌 pH 8～9 では、くみあい珪鉄の添加

量が増えても脱窒量が増加しませんでした。脱窒菌は、酸性に耐性があり、アルカリ性に弱く、高 pH 処理では成長が抑制されることが報告されています（深川ら、1987）。つまり、くみあい珪鉄の添加により、土壌 pH が脱窒に最適な pH からアルカリ性側にシフトする可能性が示唆されました。

添加基質の C/N が低い（窒素源が比較的多い）条件では、くみあい珪鉄の添加量が増えるにつれ脱窒量が増加しました。C/N が低い土壌では、分解が速く水溶性有機炭素を放出することで脱窒を促進することが報告されています（Surey et al., 2020）。添加基質の C/N が高い（炭素源が比較的多い）条件では、くみあい珪鉄の添加の有無にかかわらず、脱窒量が多くなる傾向にありました。添加基質の C/N が高い場合に、初期に脱窒が生じやすく、土壌が強い還元状態（脱窒は弱い還元状態で進行）となることから、くみあい珪鉄の効果が現れにくいことが考えられます。添加基質の C/N が低い場合に、くみあい珪鉄の添加により、添加した窒素源が効率的に利用されることが考えられます。

## 4. まとめ

### ①飼料イネ栽培における窒素除去

飼料イネ栽培における窒素除去率は9割以上であり、飼料イネと脱窒を活用することにより地下水の窒素除去が可能であることがわかりました。

### ②飼料イネ水田の通年湛水（冬期・夏期）における窒素除去

窒素除去率は、冬期湛水で6割、夏期湛水で9割であり、飼料イネ水田の窒素除去力を最大限に活用するために、冬期湛水の実施が有効であることがわかりました。

### ③飼料イネ水田における珪鉄施用が窒素除去率に与える影響

飼料イネ水田において、珪鉄を施用することで表面流出、地下浸透による窒素流出量が減少、植物体による窒素吸収量、脱窒量が増加することから、窒素除去率の増加につながることが確認されました。

### ④珪鉄施用が飼料イネの生長量と窒素吸収に与える影響

食用品種は、窒素が制限要因となり、珪鉄施用による窒素吸収量の増加がみられませんでした。また、飼料イネ品種は、珪鉄施用により‘モグモグあおば’（WCS・飼料用米兼用品種）のみ乾燥重、窒素含量が増加しました。珪鉄施用によるイネの乾燥重、窒素含量を増加させるためには、施肥窒素量、品種の選択、刈取り時期等の考慮が必要であることがわかりました。

### ⑤珪鉄添加が脱窒量に与える影響

土壌 C/N が低い土壌で、珪鉄添加による脱窒量が増加しました。また、鉄、石灰濃度が高い珪鉄資材で脱窒量の増加がみられました。脱窒量の増加は、初期土壌 pH

5～7、添加した基質比が比較的低い（C/N1.2～2.3）条件で、珪鉄添加による脱窒量増加が確認されました。珪鉄資材やその添加量、土壌の化学特性、添加窒素肥料により、珪鉄添加の効果が異なることが確認されました。

第1期熊本県地下水と土を育む農業の推進に関する計画（平成27年度～令和元年度）において、飼料イネ水田の窒素除去能力の高さを報告しました。そこで、本試験では、飼料イネ水田を積極的に活用し、地下水の硝酸性窒素を除去するため、飼料イネ水田の通年湛水（冬期湛水と夏期湛水）や珪鉄の施用による飼料イネ水田の窒素除去増加が確認されました。従来からある水田を利用した本試験結果が、本県の地下水の低コストかつ省力的な窒素除去の一助となることを期待します。

#### 《参考文献》

- 新良力也・渥美和彦（2007）硝酸性窒素濃度の高い灌漑水を通年湛水した水田の冬期における窒素除去能、日本土壤肥料学雑誌 78（3）、299-302.
- Focht, D., D. (1974) The effect of temperature, pH, and aeration on the production of nitrous oxide and gaseous nitrogen – A Zero-order kinetic model, Soil Science 118（3）、173-179.
- 深川勝之・原田利男・竹内正美・村上定瞭・中西弘（1987）生物学的有機物・窒素の同時除去に関する基礎的研究－脱窒菌の増殖特性－, 宇部工業高等専門学校研究報告 33、67-71.
- IPCC（2013）Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Chapter6: Carbon and Other Biogeochemical Cycles. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>（2025年9月取得）.
- 糟谷真宏・小竹美恵子（1997）地下水かんがい由来する硝酸態窒素の水田における除去、日本土壤肥料学雑誌 68（6）、123-131.
- 丸山芳治（1976）生物による窒素固定、日本農芸化学会誌 50（5）、121-132.
- 小川吉雄・酒井一（1985）水田における窒素除去機能の解明、日本土壤肥料学雑誌 56（1）、1-9.
- 奥田東・高橋英一（1961）作物に対するケイ酸の栄養生理的役割について（第3報）ケイ酸の供給量が水稻の生育ならびに養分吸収におよぼす影響、日本土壤肥料学雑誌 32（11）、533-537.
- 小野信一・古賀汎（1984）水田土壌表層における窒素の自然集積と藍藻による窒素固定、日本土壤肥料学雑誌 55（5）、465-470.
- Song, A., Fan, F., Yin, C., Wen, S., hang, Y., Fan, X., Liang, Y. (2017) The effects of silicon fertilizer on denitrification potential and associated genes abundance in paddy soil, Biol. Fertil. Soils. 53, 627-638.
- Surey, R., Lippold, E., Heilek, S., Sauheitl, L., Henjes, S., Horn, A., M., Mueller, W., C., Merbach, I., Kaiser, K., Bottcher, J., Mikutta, R. (2020) Differences in labile soil organic matter explain potential denitrification and denitrifying communities in a long-term fertilization experiment, Applied Soil Ecology 153, 103630.
- 住田弘一（1962）水稻のケイ酸吸収に対する窒素栄養の影響、日本土壤肥料学雑誌 63（6）、633-638.
- Zhang, L., Jiang, M., Ding, K., Zhou, S. (2019) Iron Oxides affect denitrifying bacterial communities with the *nirS* and *nirK* genes and potential N<sub>2</sub>O emission rates from paddy soil, European Journal of Soil Biology 93, 103093.

## 2-3 カラム試験による水田土壌からの無機態窒素の溶出量の評価

熊本県立大学 環境共生学部 小林 淳 教授

### 1. 試験の目的

白川中流域では水田湛水による地下水の涵養が行われ、地下水量の保全に大きな役割を果たしています。一方、地下水質の保全の観点からは、水田湛水によって水田土壌中の硝酸性窒素などの窒素成分がどのくらい溶け出していくのかを評価する必要があります。そこで、本試験では県内の3地域で採取した水田土壌を用いて、どのくらい窒素が溶け出してくるのかを3つの温度条件で実験的に明らかにすることを目的としました。

### 2. 試験の方法

#### ① 供試土壌

実験に使用した水田土壌の採取場所および土質を表1に示します。合志・阿蘇の水田土壌は黒ぼく土、八代の水田土壌は沖積土です。土壌は乾燥させた後、ふるい（2mmメッシュ）をかけて稲わらや小石などを取り除き、実験に使いました。

表1 実験に用いた水田土壌の採取場所および土質

	合志	阿蘇	八代
採取場所	熊本県農業研究センター農産園芸研究所	熊本県農業研究センター高原農業研究所	熊本県農業研究センターアグリシステム総合研究所
土質	黒ボク土	黒ボク土	沖積土（低地土）

#### ② 実験の準備

実験にはアクリル製の円筒状カラム（長さ340mm、外径φ50mm、株式会社モル社製）（以下、「カラム」と呼びます）を用いました。カラムの下端にガラスウールを敷き、つぎにガラスビーズ（直径2mm）を2cmの高さまで入れ、この上にろ紙（No.2、ADVANTEC）を敷きました。そして、カラム内の土壌の厚さが30cmになるように蒸留水で湿らせた土壌を入れ、ラバーハンマーやバイブレーターを用いて振動を与えて土壌を締固めた後、2日間静置しました。その後、土壌の表面にろ紙を敷き、ガラスビーズ（2cm）、ガラスウールを詰め、カラム上端を閉じました。実験開始前にカラム上部に含まれる蒸留水を追い出すため、カラム下端からペリスタポンプで蒸留水を50ml流しました。

### ③ 実験手順

カラム実験は飽和実験とし、上向流試験で行いました。カラムはインキュベータ（(株)日立空調システム製 GRB-14）内に設置し、5℃、15℃、25℃の3つの温度条件で、それぞれ28日間実験を行いました（図1）。通水速度は、白川中流域の水田の減水深を参考に約10 cm/日（約200 ml）とし、ペリスタポンプで蒸留水をカラム下端から送液し、上端より排出させました。

流出水は試験開始から7日目までは毎日採取し、その後21日目までは3日ごとに採取し、その後は最終日（28日目）に採取しました（1、2、3、4、5、6、7、10、13、16、19、22、25、28日目に採取、計14回）。



図1 カラム実験の様子

### ④ 測定項目

カラムから流出した水試料については、水温、pH、電気伝導度（EC）、溶存酸素（DO）、酸化還元電位（ORP）、アンモニウムイオン（ $\text{NH}_4^+$ ）、亜硝酸イオン（ $\text{NO}_2^-$ ）、硝酸イオン（ $\text{NO}_3^-$ ）を測定しました。無機態窒素（アンモニウムイオン、亜硝酸イオン、硝酸イオン）はイオンクロマトグラフ（IC-2010、東ソー）により測定しました。アンモニウムイオン（ $\text{NH}_4^+$ ）、亜硝酸イオン（ $\text{NO}_2^-$ ）、硝酸イオン（ $\text{NO}_3^-$ ）の測定結果は、それぞれアンモニア性窒素（ $\text{NH}_4\text{-N}$ ）、亜硝酸性窒素（ $\text{NO}_2\text{-N}$ ）、硝酸性窒素（ $\text{NO}_3\text{-N}$ ）に換算しました。

土壌試料については、pH、EC、全窒素、可給態窒素、交換性陰イオンを測定しました。

## 3. 結果と考察

### ① 流出水中の窒素濃度の経日変化

各土壌を用いたカラム実験の流出水中の無機態窒素濃度を図2に示します。合志土壌では、アンモニア性窒素は低濃度（1.0～5.3 mg/L）ながらも実験最終日（28日後）まで溶出が継続しました。硝酸性窒素は実験開始直後に濃度が最も高く（136～149 mg/L）、その後大きく減少して4日目には環境基準値の10 mg/Lを下回り、6日目以降は不検出となりました。亜硝酸性窒素は実験開始4日目まで検出されることがありましたが、それ以降は検出されませんでした。

阿蘇土壌では、アンモニア性窒素は実験期間を通して検出（1.0～7.6 mg/L）されました。硝酸性窒素は実験初日に最大（79～184 mg/L）を示し、その後は大きく減少しました。概ね7日目以降は環境基準値の10 mg/Lを下回る濃度となり、実験最終日には不検出となりました。亜硝酸性窒素はどの温度条件においても検出されませんでした。

八代土壌では、アンモニア性窒素は実験期間を通して検出（1.4～14.2 mg/L）されました。硝酸性窒素は他の地点の土壌と同様に実験初日に最大（150～704 mg/L）

を示しました。その後、大きく濃度は減少しました。また、他の土壌ではほとんど検出されなかった亜硝酸性窒素が頻度高く検出（不検出～7.2 mg/L）されました。亜硝酸性窒素の溶出挙動は硝酸性窒素と類似しており、実験開始後数日間は濃度が高いものの、その後緩やかに濃度が低下しました。なお、25℃区のカラム実験では16日以降に通水が不可能になったため、実験は15日目で実験終了としました。

以上のように、いずれの水田土壌を用いた実験においても、流出水中の硝酸性窒素濃度は流出初期に高いものの、濃度は急速減少して1週間程度で検出されなくなりました。5、15、25℃で実験を行いました。各窒素成分の溶出挙動に対する温度の影響は明確ではありませんでした。

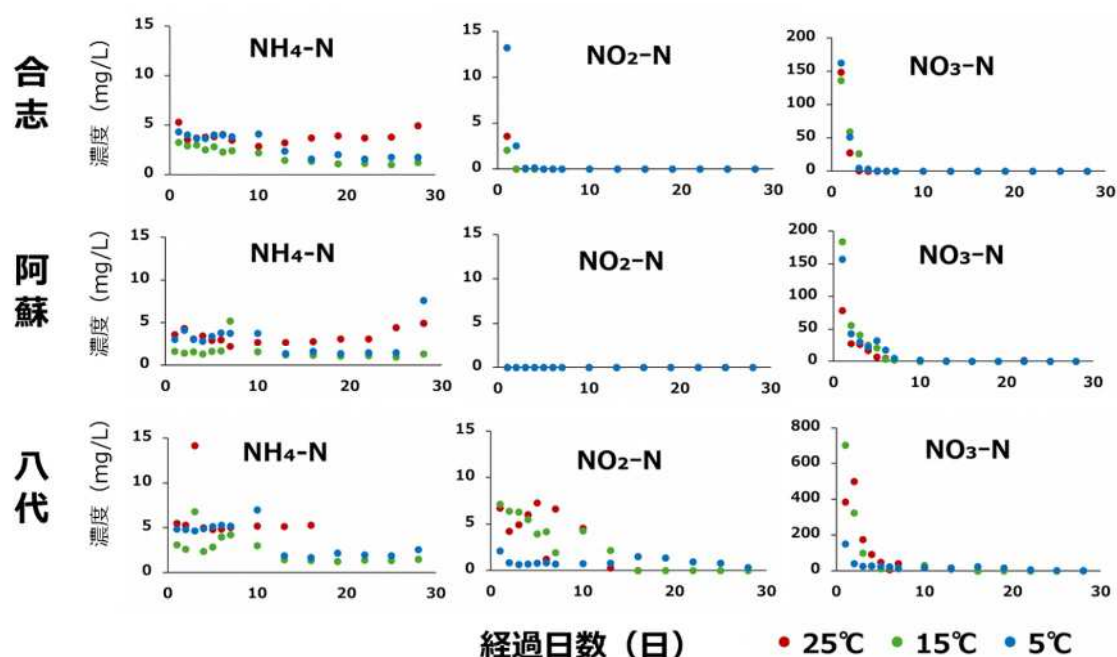


図2 カラム流出水中の無機態窒素濃度の経日変化

## ② 水田土壌からの窒素溶脱量

カラムに詰めた水田土壌から溶脱した各無機態窒素量（＝濃度 (mg/L) × 水量 (L)）を表2に示します。形態別の窒素溶脱量は硝酸性窒素が最も大きく、合志土壌では約36～41 mg、阿蘇土壌では約47～72 mg、八代土壌では約180～230 mgでした。つぎに溶脱量が大きかったのはアンモニア性窒素で、合志土壌では約9.7～21 mg、阿蘇土壌では約8.3～20 mg、八代土壌では約12～24 mgでした。

これらのアンモニア性窒素、亜硝酸性窒素、硝酸性窒素を合計した無機態窒素の溶脱量を計算しました。各無機態窒素の合計量は、合志土壌では約50～60 mg、阿蘇土壌では約67～89 mg、八代土壌では約210～254 mgと見積もられ、八代土壌で多くの窒素が溶脱していることがわかりました。阿蘇土壌では実験温度が低い条件ほど無機態窒素の溶脱量が高くなりましたが、合志、八代の土壌では温度と溶脱量の関係は明確ではありませんでした。

表2 各無機態窒素の溶脱量の合計 (mg)

	5℃			15℃			25℃		
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N
合志	21	0.74	36	9.7	0.35	40	16	2.9	41
阿蘇	20	0.0	47	8.3	0.0	72	17	0.0	72
八代	14	10	220	12	11	230	24*	6.2*	180*

\* カラムへの送水が出来なくなったため、15日目までの結果を示しています

### ③ 水田土壌からの窒素溶脱率

実験に用いた水田土壌に含まれる窒素のうち、どのくらいの割合の窒素が溶脱したのかを調べました。そのため、まず実験開始前の水田土壌に含まれる全窒素濃度（無機態窒素および有機態窒素の合計）を測定しました。土壌中の全窒素濃度は、合志土壌では0.45%と最も高く、八代土壌では0.28%、阿蘇土壌では0.18%でした。つぎに、アクリル製の円筒状カラムに詰めた水田土壌にどのくらい窒素が含まれているかを求めました。カラムに詰めた水田土壌中の全窒素量は、合志土壌では2.7g、八代土壌では1.4g、阿蘇土壌では1.1gでした。

カラムに詰めた水田土壌中の全窒素量がわかりましたので、このうちのどれくらい窒素が溶け出したのか（窒素溶脱率）を計算しました。その結果、水田土壌からの窒素溶脱率は合志土壌では1.8~2.2%、阿蘇土壌では6.3~8.3%、八代土壌では14.9~18.0%と見積もられました。水田土壌中の窒素含量は合志土壌が最も多かったのですが、窒素溶脱率では八代土壌が最も高い値を示しました。

水田土壌からの窒素溶脱率に関係する要因を探るために、窒素溶脱率と土壌中の全窒素量、可給態窒素量、交換性陰イオン量との関係を検討しました（図3）。まず、窒素溶脱率と全窒素（図3a）、可給態窒素（図3b）との関係を調べましたが、両者に相関関係はみられませんでした。つぎに窒素溶脱率と交換性陰イオン量との関係を調べたところ、統計的に有意な相関関係が認められました（図3c）。今回用いた土壌中の交換性陰イオンはすべて硝酸イオンでした。そのため、交換性陰イオン量の多い八代土壌の溶脱率が高く、交換性陰イオン量の少ない合志土壌で溶脱率が低くなったと推察されます。

以上のように、水田土壌からの無機態窒素溶脱率は1.8~18%と大きな幅がありましたが、この溶脱率の大小は土壌中の交換性陰イオン量と関係があることが示唆されました。

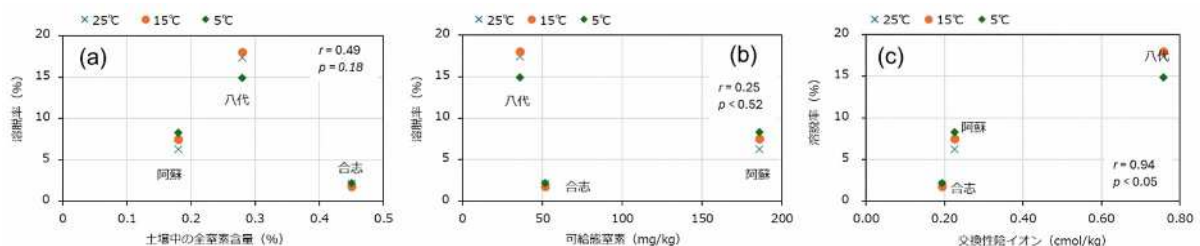


図3 水田土壌中の窒素含量・可給態窒素・交換性陰イオン濃度と窒素溶脱率との関係

#### 4. まとめ

本実験では合志、阿蘇、八代の水田から採取した土壌を用い、水田湛水による地下水涵養を想定した飽和条件での無機態窒素の溶脱実験を行いました。アクリル製の円筒状カラムに土壌を充填し、5、15、25°Cの温度条件で蒸留水を28日間通水しました。実験の結果、いずれの温度区においても硝酸性窒素が実験初期に高濃度で検出され、その後7日目程度まで大きく減少する傾向がみられました。アンモニア性窒素は低濃度ですが実験期間を通して検出されました。水田土壌からの窒素溶脱率（溶脱した無機態窒素量/土壌中の全窒素量）は、合志土壌では1.8~2.1%、阿蘇土壌では6.3~8.3%、八代土壌では14.9~18.0%となり、八代土壌で顕著に高い結果となりました。これらの窒素溶脱率は、水田土壌中の窒素含量や可給態窒素量と関わりはありませんでしたが、交換性陰イオン（硝酸イオン）量とは相関関係が認められました。そのため、土壌中の交換性陰イオン量が、水田土壌からの窒素溶脱率の1つの目安になり得ることが示唆されました。この関係が他の土質の土壌を用いた場合でも見られるのか、さらに実験を重ねて検証を行っていく必要があります。

## 2-4 水田の湛水による地下水涵養

東海大学 文理融合学部 天野 弘基 助教

### 1. 試験の目的

熊本県は、水道水源の約 80% を地下水に依存しています。この重要な水資源である地下水を持続的に利用していくためには、地下水の収支（地下水が使用される量と地下水が作られる量（地下水涵養量））を考えることが重要です。地下水が使用される量が、涵養量よりも多ければ、地下水の量は減少してしまいます。逆に、地下水の涵養量が、使用される量よりも多ければ、地下水の量は増加します。つまり、地下水を持続的に利用していくため「地下水の涵養量  $\geq$  地下水が使用される量」である必要があります。また、地下水の涵養量と使用される量は、具体的な数値として把握される必要があります。これは、具体的な数値がなければ「涵養量を〇トン増やさなければならぬ」、「節水して水の使用量を〇リットル減らさなければならぬ」といったことを考え、対策を講じることはできないためです。

地下水は、畑や森林などの水が浸透しやすい土地「涵養域」に雨が降り、地下へ浸透することで涵養されます。雨以外にも、例えば、稲を育てるために川から水を引いて水田を湛水する（水田に水を溜める）ことで、地下水は涵養されます。県内の白川中流域の水田は「ザル田」とも呼ばれ、水がとても浸透しやすい特徴があり、地下水の涵養になくってはならない存在です。そのため、熊本県では水田は地下水を涵養する重要な土地であると認識されています。

このような背景から、熊本地域（熊本市を中心とした 11 市町村）、阿蘇地域などにおいて、水田の湛水による地下水涵養量が、これまで評価されてきました。しかし、熊本県の北部・南部地域では、評価されていませんでした。そこで、本試験では熊本県の北部に位置する玉名市、南部に位置する八代地域と球磨地域の水田を対象として、2021 年度から 2024 年度において水田の湛水による地下水涵養量を評価しました。

### 2. 試験の方法

水田の湛水による地下水涵養量を評価するために、まず、水田の減水深調査を実施しました。減水深とは、水田に溜まっている水の水深が 1 日あたりどのくらい低下するか示すものです。そして、減水深調査とは、水田の「水口」、「尻後」を閉じて水田への水の出入りをなくした状態で、杭に付けた測標から水深の時間変化を観測する調査です（写真 1）。この減水深調査により、表 1 のような結果を得ることができます。この結果をグラフ化すると図 1 のようになります。表 1・図 1 に示した調査の結果から、調査を実施した水田では 1 分間で約 0.03mm 水深が低下することがわかります。これに、1440 分（＝24 時間＝1 日）を掛けることで 1 日当たりの減水深が 47.5mm であることがわかります。水田は、田植えから 2 カ月ほど経過したときに、根腐れ防止や土中の有害ガスを抜く等の目的で、田んぼの水を抜く作業（中干し）が行われます。

この中干しによって水田の土にひび割れ（クラック）ができ、減水深が変化します。そのため、減水深調査は中干しの前と後の2回実施しました。



写真1 減水深調査の様子

表1 減水深調査の結果

時間	水位 (cm)	経過時間 (時分)	経過時間 (分)	水位低下高 (mm)
9:45	10.8	0:00	0	0.0
10:45	10.6	1:00	60	2.0
11:39	10.4	1:54	114	4.0
12:32	10.25	2:47	167	5.5
13:34	10.05	3:49	229	7.5
14:35	9.85	4:50	290	9.5

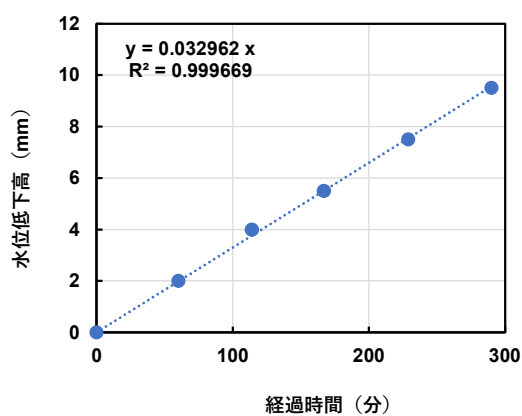


図1 経過時間と水位低下高の関係

水田の湛水による地下水涵養量は、「日浸透速度×水稲作付け面積×湛水日数」によって求めることができます。日浸透速度とは、実際に地下に浸み込む水の速度のことです。「日浸透速度 = 減水深 - 蒸発散量」により求めることができますが、蒸発散量は数 mm 程度なので、「日浸透速度 ≒ 減水深」としました。水田の枚数は、かなりの数であるため、全ての水田で減水深調査を実施することはできません。そのため、数 10 箇所減水深調査を実施し、これらの水田の日浸透速度のデータをもとにクリギング法を用いて、日浸透速度の等値線を作成しました（図 2）。この等値線から各小字の日浸透速度を推定しました。水田では、主食用米、飼料用米、WCS（ホールクロップサイレージ）が栽培され、それぞれ栽培期間（湛水期間）が異なります。そのため、各小字に対して、各水稲の作付け面積を集計するとともに、異なる栽培期間を設定して、小字ごとに涵養量を計算しました。なお、作付け面積の集計には、水田台帳を使用しています。

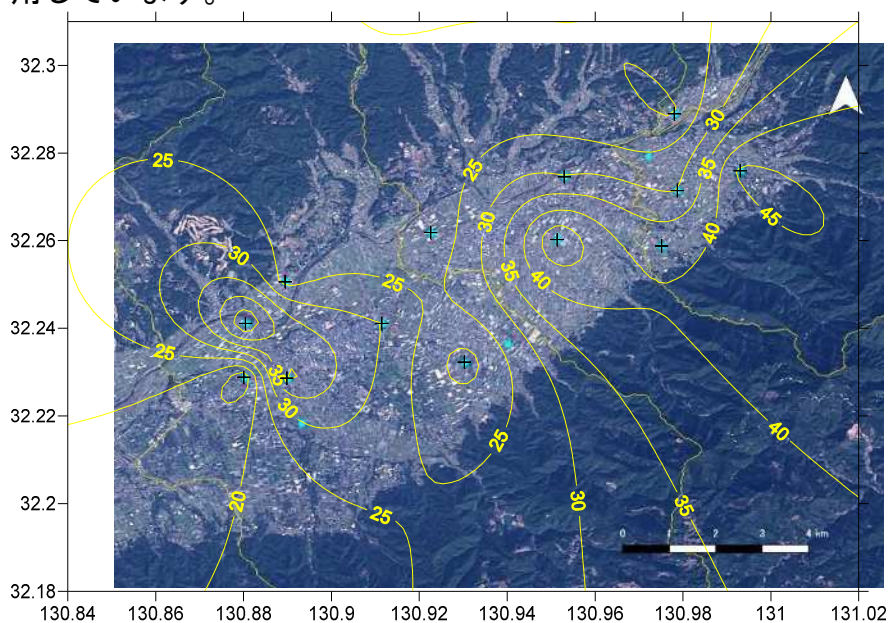


図 2 上球磨地域の日浸透速度分布（中干し前）

（背景図：国土地理院、2025）

### 3. 結果と考察

玉名市、八代地域、球磨地域における水田の湛水による地下水涵養量を表 2 に示します。なお、過去に実施された熊本地域、阿蘇地域の試験結果もあわせて示しています。

玉名市における水田の湛水による地下水涵養量は、約 6,964 万  $m^3$  となりました。小・中学校の一般的な 25m プールに溜める水（長さ：25m、幅 12.5m、深さ：1m）が約 312.5  $m^3$  なので、25m プール約 22.3 万杯分の水が玉名市の水田を通して地下水を涵養したことになります。日涵養高をみると、24.6mm/日です。玉名市のほとんどは干拓地ということもあり、日涵養高は熊本県内の他の市町村と比べると小さい値を示しました。日涵養高は小さいですが、玉名市の水稲作付け面積は、他市町村よりも大きいため、涵養量も他市町村より多くなっています。

八代地域では、宇城市、氷川町、八代市について評価しました。各市町における水田の湛水による地下水涵養量は、宇城市：約 2,365 万 m<sup>3</sup>、氷川町：約 1,760 万 m<sup>3</sup>、八代市：約 8,309 万 m<sup>3</sup>となりました。玉名市と同じように 25m プールで考えると約 5.6～26.6 万杯分の水が各市町の水田を通して地下水を涵養したことになります。日涵養高をみると、宇城市：19.5mm/日、氷川町：18.4mm/日、八代市：17.6mm/日です。干拓地ということもあり、日涵養高は熊本県内の他の市町村と比べると小さい値を示しました。日涵養高は小さいですが、八代市は水稲作付面積が他市町村よりもかなり大きいため、涵養量も他市町村より多くなっています。

球磨地域では、水上村、湯前町、多良木町、あさぎり町、錦町、相良村について評価しました。各市町村における水田の湛水による地下水涵養量は、水上村：約 160 万 m<sup>3</sup>、湯前町：約 1,438 万 m<sup>3</sup>、多良木町：約 3,683 万 m<sup>3</sup>、あさぎり町：約 7,791 万 m<sup>3</sup>、錦町：約 3,082 万 m<sup>3</sup>、相良町：約 491 万 m<sup>3</sup>となりました。玉名市、八代地域と同じように 25m プールで考えると、約 0.5～24.9 万杯分の水が各市町村の水田を通して地下水を涵養したことになります。日涵養高をみると、水上村：約 37.5mm/日、湯前町：約 40.5mm/日、多良木町：約 37.2mm/日、あさぎり町：約 42.3mm/日、錦町：約 40.5mm/日、相良町：約 36.5mm/日です。日涵養高は熊本県内の他の市町村と比べると中間的な値を示しました。あさぎり町は、八代市に匹敵する涵養量となりましたが、水稲作付け面積は、2分の1以下です。これは、水稲作付け面積が小さくとも、日浸透速度が高いと、多くの地下水が涵養されることを示しています。

#### 4. まとめ

2021 年度から 2024 年度において、熊本県北部に位置する玉名市、南部に位置する八代地域と球磨地域の水田を対象として、水田の湛水による地下水涵養量を評価しました。その結果、各地域に位置する市町村の水田から、25m プール 0.5～26.6 万杯分もの水が地下水を涵養していることがわかりました。また、日涵養高は地域ごとに特徴があり、玉名市と八代地域は県内では比較的小さい値であり、球磨地域では中間的な値であることがわかりました。

このようなデータは、先に述べた通り地域の水収支を考える上で重要なデータです。熊本県で持続的に地下水を利用していくための基礎的なデータとしてご活用いただけると幸いです。

表2 熊本県内の水稲作付状況と地下水涵養量

地区名	市町村	水稲作付け面積 (m <sup>2</sup> ) *	作付け率 (%)	涵養量 (m <sup>3</sup> )	日涵養高 (mm/日) **
県北	玉名市	26,179,111	63.6	69,640,600	24.6
菊鹿盆地	山鹿市	24,529,066	72.5	90,260,173	34.1
	菊池市	15,404,349	72.7	46,498,008	27.9
	合志市	3,163,860	63.5	6,229,357	18.2
熊本地域	大津町	3,925,888	55.4	30,567,250	72.1
	菊陽町	2,989,974	45.4	18,604,306	57.6
	熊本市東部	654,260	67.9	5,261,892	74.5
	大津町北部	574,008	54.1	6,357,944	102.6
	西原村	767,602	25.7	3,714,939	44.8
	益城町	8,213,576	74.9	6,221,470	7.0
	御船町	4,654,320	46.6	14,631,215	29.1
	甲佐町	4,876,204	64.6	12,733,714	24.2
八代地域	宇城市	11,219,164	80.7	23,645,364	19.5
	氷川町	8,869,767	79.8	17,595,904	18.4
	八代市	43,720,109	80.8	83,088,485	17.6
球磨地域	水上村	396,293	65.9	1,604,126	37.5
	湯前町	3,290,619	58.7	14,381,501	40.5
	多良木町	9,154,353	58.5	36,826,150	37.2
	あさぎり町	17,059,145	48.5	77,914,495	42.3
	錦町	7,042,084	48.5	30,823,080	40.5
	相良村	1,246,800	53.2	4,909,351	36.5
阿蘇地域	阿蘇市	31,268,730	76.6	168,210,014	49.8
	南阿蘇村	12,951,955	64.7	81,286,032	58.1
	高森町	441,922	74.3	2,973,794	62.3

\*宇城市と八代市は、い草を含む

\*\*日涵養高=涵養量÷水稲作付け面積÷平均的な栽培日数

《引用文献》

国土地理院ウェブサイト

(<https://cyberjapandata.gsi.go.jp/xyz/seamlessphoto/{z}/{x}/{y}.jpg>) データソース :  
Landsat8 画像 (GSI, TSIC, GEO Grid/AIST), Landsat8 画像 (courtesy of the U.S.  
Geological Survey), 海底地形 (GEBCO)

# 3 試験のとりまとめ

## 各試験の結果

### 1 硝酸性窒素問題の現状：改善点と問題点

- ◎農地の減少と相まって、これまでの農地由来の窒素負荷低減により、植木や西原、大津の白川低地等一部地域で地下水中の窒素濃度が減衰している傾向が示唆された。
- ◎1985年頃ピークを迎えた畜産由来の窒素負荷の影響により、台地部の地下水における硝酸イオン濃度は依然として高く、今後の推移を注視していく必要がある。
- ◎地下水水質の監視と改善対策を効果的に講じていくため、帯水層中の窒素動態を再現でき、将来予測を可能とする地下水流動モデルの構築を進める。

### 2 飼料イネ栽培での珪鉄資材施用と窒素除去

- ◎珪鉄を施用することで窒素流出量の減少、飼料イネの窒素吸収量、脱窒量が増加し、窒素除去率が向上する可能性が示された。

### 3 カラム試験による水田土壌からの無機態窒素の溶出量の評価

- ◎水田土壌中の交換性陰イオン（硝酸イオン）量が水田土壌からの窒素溶脱率の一つの目安となることが示唆された。

### 4 水田の湛水による地下水涵養

- ◎水稻作付面積および日浸透速度が大きい地域で地下水涵養量が多い。
- ◎玉名・八代（宇城市含む）・球磨地域における地下水涵養量は、約36,000万m<sup>3</sup>

## 試験のとりまとめ

### 地下水の質への効果

- これまでの**農地における窒素負荷低減の取組み**が、実際に地下水中の窒素濃度の減衰として現れている可能性が期待
- 飼料イネ水田**における**珪鉄**の施用が地下水質改善に貢献する可能性も期待

### 地下水の量への効果

- 水田湛水**は地下水の確保に**大きく寄与**

## 4. さいごに

今回の試験を通じて、これまでの硝酸性窒素削減の取組みの効果が見え始め、改めて農業生産活動が地下水の質と量に及ぼす影響を確認することができました。

地下水の質について、過去10年（2009～2019年）の地下水中の硝酸性窒素濃度の解析により、これまで濃度が高かった熊本地域の台地部周辺で低下してきていることが示唆されました。これは、農地や農業人口の減少も考慮しなければならないものの、これまでの硝酸性窒素削減の取組みが効果を発揮してきた結果だと評価できます。一方で、台地部では依然として濃度が高い状況にあり、今後も推移を注視する必要があるとともに、取組みの継続が重要であると考えられます。また、地下水水質の監視と効果的な対策を講ずるために、地下水保全と生産性の高い稼げる農業を実現するシナリオが描ける（将来予測を可能とし、地下水の質への影響が少ない窒素許容量を算出できる）窒素動態モデルの構築に期待を寄せているところです。

地下水の量について、今回の玉名地域や県南地域の水田における地下水かん養量の結果が加わったことで、ほぼ県内全域の水田の地下水かん養能力を把握することができました。令和7年度の上益城地域の調査で、県内全域の主要な水田地域のデータが揃うこととなります。今後はこの能力を活かし、地下水の量を確保し続けるために、水田の作付面積や水田湛水の取組みを維持・拡大していくことが重要と考えます。

その地下水かん養に大きく貢献している水田湛水ですが、営農上、窒素の施用は必要です。これまでの調査で水田（土壌）からの窒素流出は少ないことが分かっていますが、今回の調査で、水田土壌からの窒素溶脱率の目安として交換性陰イオン（硝酸イオン）量が活用できる可能性が示唆されましたので、水田湛水の地下水の質への影響を確認する手法として活用が期待されます。また、主食用米より窒素施用量の多い飼料用米の作付水田で、さらに窒素溶脱量を削減する技術を検討しました。珪鉄の施用により削減効果が見られたので、有効的な活用につなげるべく応用していく必要があると考えます。

5年間の試験を通じて、熊本県の地下水に関して多くの知見を得るとともに、新たな課題も明らかになりました。今後は得られた知見を活用しつつ課題解決に取り組み、条例の目的である「熊本県の宝である地下水と土を50年先、100年先の未来へ引き継ぐ」ために、農業分野からの取組みを一層推進していく必要があります。

【お問い合わせ】

熊本県農林水産部生産経営局農業技術課

〒862-8570 熊本市中央区水前寺 6-18-1 TEL : 096-333-2383

発行者：熊本県

所 属：農業技術課

発行年度：令和7年度（2025年度）