

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24580347

研究課題名(和文) 農業系由来の蓄積窒素負荷に関する研究

研究課題名(英文) The research on the accumulated nitrogen load from agricultural nitrogen fertilizer

研究代表者

黒田 久雄 (KURODA, Hisao)

茨城大学・農学部・教授

研究者番号：20205256

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)：「農業系由来の蓄積窒素負荷に関する研究」以下のことが明らかになった。農業・畜産の蓄積残存窒素量が河川の窒素濃度に大きな影響を与えることを明らかにした。霞ヶ浦流域水収支から霞ヶ浦水質への影響で最も大きかったのは、人工的な水位変動であった。農業・畜産による下層土の蓄積窒素の状況を明らかにした。畑地下層土では、窒素除去されないことを脱窒活性から明らかにした。畑地から溶脱した窒素を下流の湿地で浄化するには、表層の状態が大きな影響を与えることを明らかにしつつある。蓄積窒素溶脱の影響を緩和する対策の1つとして荒廃したモウソウチク林の管理が、希釈水増加に効果があることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：I found that the following by "The research on the accumulated nitrogen load from agricultural nitrogen fertilizer." : The amount of the accumulated nitrogen from agriculture and livestock is a significant impact on the nitrogen concentration in the rivers. : From Kasumigaura basin water balance calculation results, the largest were factors in water quality of Lake Kasumigaura was an artificial water level control. : It was measured for the accumulated nitrogen of upland subsoil by agriculture and livestock origin. : In the upland subsoil, it was shown that nitrogen is not removed from the denitrification activity. To purify the leaching nitrogen downstream on the wetlands from upland fields, it is becoming apparent that the surface soil condition is an important function. : For the accumulated nitrogen as mitigation measures of leaching, the management of dilapidated bamboo forests, was clarified that there is an effect to increase dilution water.

研究分野：農業農村工学

キーワード：蓄積窒素 窒素汚染 面源 施肥 総投入窒素量 脱窒 希釈水

1. 研究開始当初の背景

指定湖沼である霞ヶ浦は、湖沼水質保全計画を策定し水質改善を図っているが、環境省が公表している公共用水域水質測定結果では湖沼の環境基準である COD 濃度では、ワースト5以内であった。特に平成21年度には、湖沼水質保全計画開始以来、北浦において過去最悪の COD 濃度 10mgL-1 を記録した。この原因として、北浦流入河川の窒素濃度が高いことが考えられた。例として銚田川は、昭和60年度は 3.6 mgL-1 であったが、年々濃度が上昇し、平成19年度には、人の健康の保護に関する環境基準値である「硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素」濃度 10 mgL-1 を超過する、年平均 11 mgL-1 となった。湖沼水質保全計画上では銚田川流域の窒素発生負荷量は減少傾向にあり、銚田川の濃度と対応していないため、その原因を解明しなくては湖沼水質保全計画自体が成立しない状況となっていた。また、平成19年度の濃度上昇は今までの上昇と傾向が異なり異常な上昇であった。一方私は、1994年頃に馬廐肥の投入が畑地下流の湧水の窒素濃度に大きな影響を与える調査結果を得ていた。この類推から窒素投入と蓄積窒素の関連が大きな背景にあるとの仮説を持つに至っていた。私は平成21年度より茨城県環境審議会霞ヶ浦専門部会委員となり農業系の対策の長となった。しかしながら平成23年度から始まる第6期計画にはデータ収集など間に合わず、蓄積窒素の仮説を検証できるデータを収集し、第7期計画に間に合わせる必要があった。幸いにも茨城県環境審議会霞ヶ浦専門部会でも同様の認識を持つことになった。その結果、第6期霞ヶ浦に係わる湖沼水質保全計画の「3湖内の水質と課題、(2)課題 イ 北浦に『…北浦についても西浦同様、流入河川から依然として高い濃度の窒素やリンの供給が続いていることから、生活排水対策等によるリンの削減を重点的に進めるとともに、窒素の汚濁負荷割合の高い畜産・農地からの負荷削減対策等を進め、流入河川及び湖内の全窒素・全リン濃度の改善を図っていく必要があります。特に、流域内の窒素の蓄積をより一層削減するとともに、底泥からのリンの溶出を削減する必要があります。』と記載されている。

2. 研究の目的

閉鎖性水域の富栄養化に及ぼす面源からの流出負荷の影響は、点源対策が進むと同時に比重を増している。霞ヶ浦の水質改善には、畜産・畑地由来の面源流出負荷対策が必要とされているが、その流出メカニズムの解明は未だ不十分である。畜産・畑地由来の面源系由来窒素汚染メカニズムは、総投入窒素量(化学肥料+有機質肥料(一般にたい肥といわれている場合もある))、蓄積窒素(下層土壤中に移行した有効利用できない形態の窒素成分の蓄積)、不可避溶脱窒素(穀物等

以外の野菜栽培上最低限必要な窒素成分)と3つの要因があげられる。本研究は、特に蓄積窒素問題に焦点を絞り、化学肥料と有機質肥料を合わせた総投入窒素量と下層土壌への移行メカニズムの関係を明確にする。また、蓄積窒素汚濁の解明と共に、その対策についても検討する。

3. 研究の方法

霞ヶ浦流域内で窒素汚染を起こす要因について、文献調査の結果をもとに、広域窒素フローモデルと霞ヶ浦流域水収支モデルを作成した。前者は1970年から2010年までを対象に、後者は1975年から2010年までを対象にした。

広域窒素フローモデルは、霞ヶ浦流域の窒素フローに着目し霞ヶ浦水質の変動要因を明らかにするために作成した。要因として、人間・畜産・農業へのインプット量とアウトプット量をできるだけ詳細にデータを収集し、解析した。例えば、人は、食事量を厚生労働省の国民健康・栄養調査から摂取たんぱく質量を求め、動物性などに分類された値に対して、食品成分表から窒素量に換算した。農業についても、栽培作物品種ごとに施肥量と収穫量を求め、農地に残る残渣を計算した。畜産では、飼料量を求め、豚や牛などは部位によるたんぱく質量を食品成分表から求めて窒素換算した。その結果をもとに、流域に貯留する窒素量を経時的に求め、霞ヶ浦水質変動と検討した。

また霞ヶ浦流域水収支モデルは、霞ヶ浦流域および近傍のアメダスデータをもとにGIS上で面降水量、面蒸発散量を算出し、水道水や農業用水など霞ヶ浦流域外へ流出する水量を差し引いて流域外流出量を求めた。流域外流出量は、国土交通省霞ヶ浦河川事務所より常陸川水門流出量を計算したものと比較し精度を検討した結果、十分な精度であった。その後、水収支と霞ヶ浦水質との検討を行った。これらは、既存の統計データや既出の論文・著書から詳細にデータを積み上げて霞ヶ浦水質特に窒素とCOD濃度の関連を検証した。

次に、銚田川の窒素濃度上昇の原因は、畑地への総投入窒素投入(化学肥料+有機質肥料(堆肥など))による蓄積窒素が時間遅れで流出するためであるという仮説を立てた。これは、以前測定した湧水濃度変化と今回作成した広域窒素フローモデルから予測されているため、仮説というよりも検証に近い。そのため、畑地下層土での窒素を測定すること畑地下層で窒素が浄化されないという両者を実証する必要がある。直接の対象は畑地であるが、今回は異なる土地利用形態および履歴の5カ所で下層土を不攪乱でサンプリングするためにボーリング調査を行った。通常のボーリング調査は、ケーシングパイプを回転させないで振動のみで行った。また、土壌はパイプ内にビニールを貼ってコンタミが起らないように行った。その後、霞ヶ浦環

境科学センターにおいて土壤中の窒素量を分析し、さらにアセチレン阻害法で脱窒活性を測定した。脱窒活性測定については、畑地下層土や透水層中で脱窒が起きているとの論文・著書があるが、蓄積窒素問題から考えると、畑地下層土は酸化条件であり、有機物も少ないため劇的に窒素減少につながるような脱窒は起きていないことを証明するためにいった。

4. 研究成果

広域窒素フローモデルから得られた最も大きな結果は、農業系の肥料と作物の差から農地残存窒素量を求め、それに既存の研究から溶脱率を利用して農地に「蓄積する農地残存窒素量」を算出した。また畜産に関しては、飼料と肉類の差から、余剰堆肥窒素量を算出しこれに既存の研究から輩出率を用いた「蓄積する余剰堆肥窒素量」を算出した。この両者を足したものを「蓄積残存窒素量」とし、この値と霞ヶ浦の西浦と北浦流入河川濃度（1970年から2005年間）と比較した。その結果を図1と図2に示す。

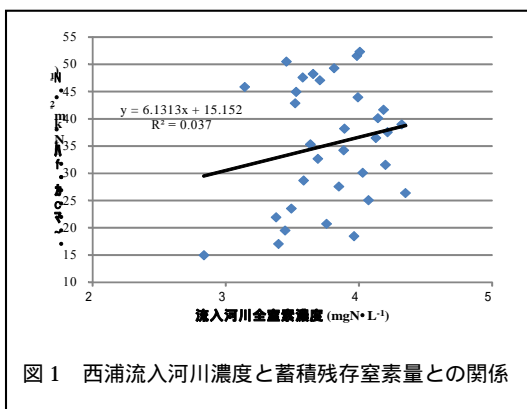


図1 西浦流入河川濃度と蓄積残存窒素量との関係

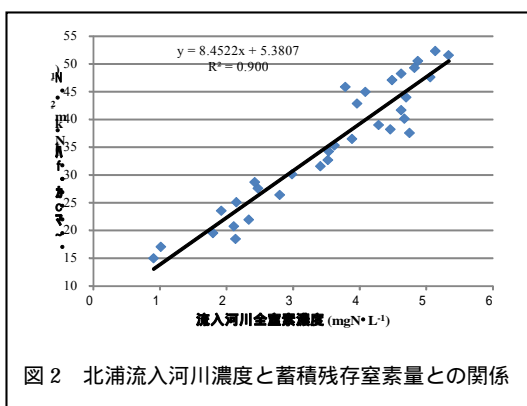


図2 北浦流入河川濃度と蓄積残存窒素量との関係

西浦流入河川全窒素濃度と蓄積残存窒素量との相関係数は、0.037 と関係はほとんどみられない。西浦への流入河川流域は、以前は畜産が盛んであった時期もあるが、現在は生活系などが主流である。農業系も水田など畜産系の有機質肥料が過剰に入り込むことも少ないので蓄積窒素との関連は認められない。

一方で、北浦流入河川との関連は、相関係

数 0.900 と強い相関が認められる。このことから、北浦流入河川の窒素濃度上昇は蓄積残存窒素量と関係が大きいことがみてとれる。さらにこの要因を詳細に解析した結果、肉用牛と豚の影響が強いことを明らかにした。このモデル結果から、特に畜産系の排泄物と窒素濃度の関係が強いことから、畜産由来の蓄積窒素問題が北浦流入河川の窒素濃度を上昇させる原因であることを検証した。

霞ヶ浦流域水収支モデルでは、霞ヶ浦水質と流域の水収支に着目して解析をした。その結果、図3に示すように霞ヶ浦水質は、霞ヶ浦総合事業により水位変動を始めたことが大きな要因であることを明らかにした。

図に示すように貯留水量とCOD濃度の関係が最も顕著に表れた。水位運用前は貯留水量が小さく、水位を上げて運用を始めた水位運

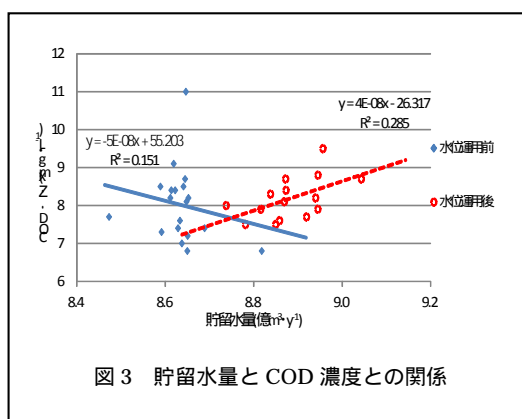


図3 貯留水量とCOD濃度との関係

用後はCOD濃度が高くなった。このように、湖沼水質は、水量と水質の関係が顕著になって表れる。

近年、北浦は西浦よりも水質が悪化し、第六期霞ヶ浦に係わる湖沼水質保全計画では、北浦と西浦の対策を別にしてある。北浦は、畜産と農業の窒素排出負荷の量が大きく、これらの対策を行わないと、水質改善は期待できない。特に、今まで計算してきた施肥量×溶脱率の関係は、年変化を考慮に入れないため正確な推定にはなっていない。そこで、施肥してから時間遅れで出てくる施肥について考慮する必要性が出てきた。

蓄積窒素は、根群域である作土層以下に溶脱し植生による吸収除去ができない窒素のことである。畑地は酸化層であるため窒素形態は硝酸態窒素となっている。特に養豚が盛んな銚田川流域は広域窒素フロー解析の結果からも、窒素濃度と畜産との関係が強い地域である。モデルで示唆される蓄積窒素をボーリング調査で明らかにした。土地利用は、市街地、林地、畑地（休耕）、荒地、ハウス栽培施設の5カ所で行った。市街地調査は2013年11月21日に行った。調査地点は銚田川下流部に位置しており、地下約4m地点で地下水位があった。畑地調査は2013年12月5日に行った。調査地点は約10年休耕していたが、毎年耕起、管理がなされている。荒地調査は2014年2月20日に行った。調査地点

は約 30 年前に畑地であった場所をプールに整備し、その後プールが取り壊されさら地になった場所である。林地調査は 2014 年 3 月 6 日に行い、スギとヒノキの混合林である。ハウス栽培施設の調査は 2014 年 9 月 4 日に行った。メロンが栽培されている。なお、地下水位は市街地以外では観測されなかった。

各土層中の窒素濃度を図 4 に示す。

市街地は鉾田川下流に位置し、地下水位が観測された約 4 m は、北浦水位以下に相当する。このため常に還元状態であり、地下水の

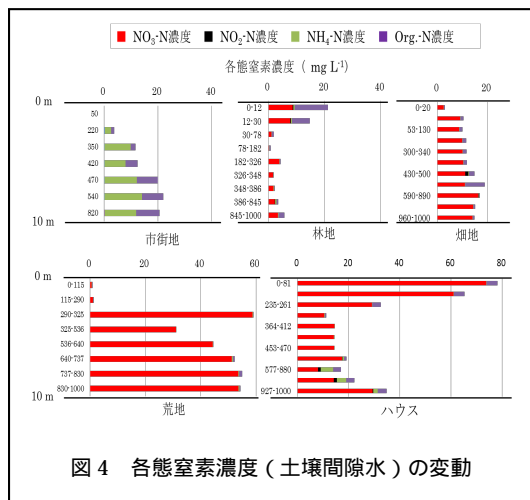


図 4 各態窒素濃度 (土壌間隙水) の変動

移動はほとんど無いと考えられる。そのため、窒素形態はアンモニア態窒素が主流であり、これは過去に北浦に堆積した残存有機物の影響であると考えられる。

林地は上層に窒素濃度の高い層が認められる。これは、森林の A0 層に相当し、落葉等が堆積しているため窒素濃度が高くなっていると考えられる。下層の窒素濃度は他と比較しても最も低い。下層に行くにつれ若干窒素濃度が上昇しているが、これは上層から溶脱した窒素ではないかと考えている。

畑地は 10 年間休耕しながらも毎年耕起している圃場である。そのため、新たに窒素肥料は投入していないにもかかわらず、窒素濃度は高かった。特に下層に行くにつれ濃度が高くなっている。これは上層に蓄積していた窒素が徐々に下層に移動しているためと思われる。

荒地は、約 30 年前に畑地から町営プールになり 2011 年に取り壊された跡地である。プール時代には表層はコンクリートで覆われていたため浸透はほぼ無かった。そのため、荒地が最も蓄積窒素の動態がよくわかる例となった。下層の濃度が高いのは、おそらく 30 年前に施肥された窒素が土層中に残っていたためと考えられる。また上層の濃度が低いのは、取り壊し後の降雨の浸透によるものと考えられる。この地域はおおむね 1 年で 1 m の浸透速度があると考えられる。そのため、取り壊しから調査の間約 2 年間の間に、地下浸透は 2 m 下降したことになる。グラフはそれを顕著に表している。

ハウス栽培は、春夏にメロン栽培を行って

いる施設である。この施設は約 20 年間にわたってメロン栽培を行っている。そのため、上層には作土層に残った残存窒素の影響が強く残っている。そして、下層に行くにつれ窒素濃度が高くなっていく。農家は環境保全を考慮して栽培しているので、荒地の濃度よりも低く、施肥は管理されている裏付けとなった。

このように、異なる土地利用の下層土中の窒素濃度は、畑地、荒地、ハウス栽培では、施肥の影響を受けていることがわかった。休耕していた畑地の濃度と、ハウス栽培の下層土中の濃度を比較すると、施肥を続けていると下層に行くにつれ濃度が上昇することがわかり、施肥の影響が大きいことがわかる。また、荒地の濃度をみるとほぼ濃度が変わらないため土層中での蓄積窒素には減少することが無いように思われる。

そこで、各土層中の脱窒活性を測定した結果を図 5 に示した。

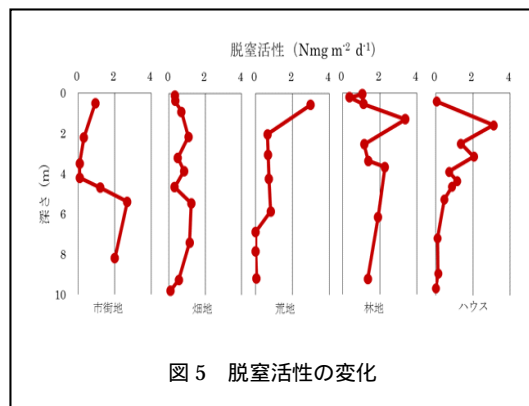


図 5 脱窒活性の変化

各土地利用の脱窒活性はほぼ、 $4 \text{ Nmg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ より低かった。市街地以外は、上層の方が高く、下層に行くにつれ低くなっている傾向があるようにも思われるが、値が低いためそこまで断定することは難しい。それは、水田土壌の脱窒活性では、 $200 \text{ Nmg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ より高い値が普通であり、それに比較すると今回の値は、脱窒活性が無いといっても過言ではない値である。このことから、畑地下層での脱窒活性は認められないことから、下層に浸透した窒素は下層で浄化されずにひたすら下降するだけであることを明らかにしたと考えている。この場所では、地下水位を観測できないほど地下水位が低かった多、穴塚大池地区でボーリングした地下水位地点の脱窒活性もほぼ無かったことから、一度土層中に浸透した窒素成分は流出するまで形態変化以外の変化はしないものと考えられる。

これらの知見から、鉾田川にみられる高濃度の窒素の発生源対策を行っても過去に蓄積された窒素成分は浄化することができないということを示している。

今回の研究の目的の 1 つに、第七期霞ヶ浦に係わる湖沼水質保全計画への適用があげられる。蓄積窒素に関しては、茨城県とも協力し合っているため、次の計画には蓄積窒素

の要素を入れるための検討をする必要がある。荒地のデータから降水量と施肥量の移動の関係が明確な証拠としてとらえることができたので、今後下層浸透分の関数化を行う必要がある。その一方で、蓄積窒素は過去に投入された窒素の影響なので、その浄化対策をオンサイトで行うことは、非常に難しい。そのため、蓄積窒素溶脱の影響を緩和する対策が必要となるので、この期間に対策を追加して研究を進めた。

対策1として、畑地下層から湧出する高濃度窒素を下流の湿地で脱窒作用を用いて浄化する方法である。これについては、過去にも多くの報告を行っている。しかし、より窒素除去効率をあげるには、湿地の中で行われている浄化メカニズムを明らかにしておく必要がある。そこで、湿地土層表面に着目して脱窒作用が起きている場所の解明を脱窒活性を利用して検討した。その結果、土層表面での脱窒メカニズムの片鱗がつかめたと考えているが、今後さらに詳細に詰めていく予定である。

対策2として、希釈効果を利用して濃度低下を図る対策を提案しようと考えている。特に、休耕地を初めとして農村地域の土地の荒廃は深刻になっている。そこで特に荒廃が目立つモウソウチク林での希釈水の増加効果の検証を行った。これは、穴塚大池のモウソウチク林を利用し、皆伐による地下水位の観測から明らかにしようというものである。その結果、モウソウチクを皆伐する前は、地下水位は減少したが、皆伐後は地下水位の回復が観測された。この理由をタンクモデルを用いて原因を明らかにした。原因はモウソウチクの蒸発散による影響であることがわかった。つまり、モウソウチクが存在すると、降水量よりも多くの蒸発散量を行うため、地下水位の枯渇を招く恐れがあることがわかった。このことにより、希釈水の枯渇にもつながっていくことがわかった。

今回の研究期間で明らかになったことは以下のとおりである。

- (1) 農業・畜産の蓄積残存窒素量が河川の窒素濃度に大きな影響を与えることを明らかにした。
- (2) 霞ヶ浦流域水収支から霞ヶ浦水質への影響で最も大きかったのは、人工的な水位変動であった。
- (3) 農業・畜産による下層土の蓄積窒素の状況を明らかにした。
- (4) 畑地下層土では、窒素除去されないことを脱窒活性から明らかにした。
- (5) 畑地から溶脱した窒素を下流の湿地で浄化するには、表層の状態が大きな影響を与えることを明らかにしつつある。
- (6) 蓄積窒素溶脱の影響を緩和する対策の1つとして荒廃したモウソウチク林の管理が、希釈水の増加に効果があることを明らかにした。

今回の期間で明らかにできなかった項目について、ほぼ整理ができたので、第七期霞ヶ浦に係わる湖沼水質保全計画への本研究の適用を検討する。蓄積窒素の概念については、いくつかの雑誌に掲載し認知度はあがっていると思う。今後、蓄積窒素の概念の導入を行い、実計画にも適用を図っていく予定である。

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)

(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 4件)

黒田久雄、『農業に起因する地下水の硝酸汚染について』、農業および園芸、89巻、1163-1164、2014、査読無

黒田久雄、『農業に関する水質保全の課題』、水土の知、81巻、706-708、2013年、査読有

黒田久雄、『水田の水循環と窒素循環』、水循環 貯留と浸透、89巻、21-24、2013、査読無

黒田久雄、『面源負荷における硝酸性窒素の起源について』、環境浄化技術、11巻、2号、37-41、2012、査読無

[学会発表](計 12件)

黒田久雄、『霞ヶ浦流域農地からの負荷削減』、茨城県霞ヶ浦環境科学センター 霞ヶ浦問題協議会、2014.11.28、茨城県霞ヶ浦環境科学センター(茨城県、土浦市)
黒田久雄・川田祐也・前田滋哉・吉田貢士、『モウソウチク林の地下水位変動について』、平成26年度農業農村工学会大会講演会、2014.08.28、朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター(新潟県、新潟市)
林 暁嵐・北村立実・吉田貢士・前田滋哉・黒田久雄、『土地利用の違いによる脱窒活性鉛直分布調査』、平成26年度農業農村工学会大会講演会、2014.08.28、朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター(新潟県、新潟市)

黒田久雄、『農地からの窒素排出負荷削減対策について』、印旛沼水質保全協議会・手賀沼水質保全協議会、2014.3.20、手賀沼親水公園(千葉県、我孫子市)

黒田久雄、『農業系面源負荷の問題点-蓄積窒素について-』、公開シンポジウム「霞ヶ浦流域研究2014」、2014.03.08、茨城県鹿嶋市立中央公民館(茨城県、鹿嶋市)
黒田久雄、『霞ヶ浦流域における窒素の現状と流域管理について』、第6回霞ヶ浦勉強会、2014.1.11、茨城県霞ヶ浦環境科学センター(茨城県、土浦市)

川田祐也、前田滋哉、吉田貢士、黒田久雄、『霞ヶ浦のCOD濃度と流域水収支の関

係について』、平成 25 年度農業農村工学会大会講演会、2013.9.5、東京農業大学（東京都、世田谷区）

八木澤弘敏、北村立実、広瀬浩二、黒田久雄、『湛水液濃度の違いによる窒素除去速度と脱窒活性について』、平成 25 年度農業農村工学会大会講演会、2013.9.4、東京農業大学（東京都、世田谷区）

黒田久雄、『農業系面源負荷が霞ヶ浦におよぼす影響』、2012 年度 日本土壌肥料学会 関東支部大会、2012.12.03、文部科学省 研究交流センター（茨城県、つくば市）

小沼優介、安瀬地一作、前田滋哉、吉田貢士、黒田久雄、『広域窒素フローによる霞ヶ浦流域の富栄養化要因の解析』、第 63 回農業農村工学会関東支部大会、2012.10.17、大宮ソニックシティ（埼玉県、大宮市）

黒田久雄、高石梨沙、吉田貢士、北村立実、吉雄卓宏、広瀬浩二、『流入負荷量と水田の窒素除去量の関係について』、平成 24 年度 農業農村工学会大会講演会、2012.9.19、北海道大学（北海道、札幌市）

KURODA Hisao, 『Control measure of diffuse nitrogen pollution in Japan: Current status and future directions』, Korea-Japan Joint Symposium The Strategy for agricultural production infra improvement after 4 major rivers restoration, 2012.5.24、ソウル（韓国）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

黒田 久雄 (KURODA, Hisao)

茨城大学・農学部・教授

研究者番号：20205256

(2) 研究分担者

無し

研究者番号：

(3) 連携研究者

無し

研究者番号：

(4) 研究協力者

無し