

(26) 笠岡湾干拓地における水質汚濁の現状と 安定同位体自然存在比を用いた汚濁機構解析

前田 守弘^{1*}・浅野 裕一¹・兵藤 不二夫²・中島 泰弘³・藤原 拓⁴
永禮 英明¹・赤尾 聡史⁵

¹岡山大学大学院環境学研究科 (〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中3-1-1)

²岡山大学異分野融合先端研究コア (〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中3-1-1)

³農業環境技術研究所 (〒305-8604 茨城県つくば市観音台3-1-3)

⁴高知大学教育研究部自然科学系農学部部門 (〒783-8502 高知県南国市物部乙200)

⁵鳥取大学大学院工学研究科 (〒680-0855 鳥取県鳥取市湖山町南101番地)

* E-mail: mun@cc.okayama-u.ac.jp

畜産主体の農業が営まれている笠岡湾干拓地では幹線排水路の窒素、リン濃度が高いことが知られているが、その汚濁機構は十分解明されていない。本研究では、飼料作物、畜産、畜産・園芸の各エリアを流下する支線排水路を定期的に調査した。また、水路、土壌、植物等に含まれる安定同位体自然存在比を分析し、窒素汚濁機構を考察した。その結果、支線排水路において、畜産エリア>畜産・園芸エリア>飼料作物エリアの順に窒素、リン濃度が高いことがわかった。また、高濃度の窒素は牛ふん堆肥由来であることや水路あるいは圃場内でアンモニア揮散や脱窒が生じていることが示唆された。さらには、牛舎近郊の土壌および牧草にはアンモニア揮散の影響が認められた。以上のように、同地域における牛ふん堆肥管理の重要性が判明した。

Key Words : cattle compost, natural abundance, nitrogen, phosphorus, stable isotope

1. はじめに

岡山県南西部に位置する笠岡湾干拓地 (35°5'N, 135°5'E) では畜産を中心に据えた循環型農業が推進されている。しかし一方で、干拓地内の遊水池のアオコ発生等が問題視され、必ずしも環境保全型農業とはいえないのが実情である¹⁾。笠岡市は1998年～2008年まで干拓地内の幹線水路および遊水池の水質調査を行ってきた²⁾。これによると、干拓地中央を流れる2号幹線排水路を中心に窒素、リン、COD濃度が高く、汚濁は年々進行している²⁾。この水質汚染の原因は、化学肥料や堆肥の過剰施用、牛舎・堆肥舎由来の洗浄水、アンモニア揮散等であると考えられる。しかし、より発生源に近い支線排水路の状況や窒素の化学形態はこれまでに調査されておらず、汚濁機構は十分に解明されていない。

近年、窒素安定同位体自然存在比 ($\delta^{15}\text{N}$ 値) を用いて汚染源の推定や脱窒の有無を調べる研究が盛んである^{3) 4) 5)}。これまでの研究では、化学肥料の $\delta^{15}\text{N}$ 値はゼロに

近く、堆肥や生活排水由来の $\delta^{15}\text{N}$ 値は10～20‰と高いことを利用して、比較的高濃度 (数 mg NL^{-1} 以上) の地下水中硝酸イオンの由来が推定されてきた^{4) 5)}。最近では、湖水や海水試料中に含まれる極低濃度 ($> 0.014 \text{ mg NL}^{-1}$) の全窒素および硝酸イオンの $\delta^{15}\text{N}$ 値を測定する手法が確立された^{7) 8)}。これは水試料中に含まれる硝酸イオンを脱窒菌によって亜酸化窒素に変換し、その同位体比を質量分析計で測定するものであり、硝酸イオンに含まれる酸素の安定同位体自然存在比 ($\delta^{18}\text{O}$ 値) も同時に分析できるため、 $\delta^{15}\text{N}$ 値と $\delta^{18}\text{O}$ 値の両方を用いたデータ解析が可能である。ちなみに、全窒素分析の場合は、ペルオキシ二硫酸カリウム分解によって、硝酸イオンに変換する前処理が必要である。しかし、脱窒菌法で全窒素、硝酸イオンの安定同位体自然存在比を測定し、農地における水質汚濁解析に用いた事例はみあたらない。

本研究では、笠岡湾干拓地の支線排水路を上流から下流にかけて調査し、水質汚濁の現状を把握した。ま

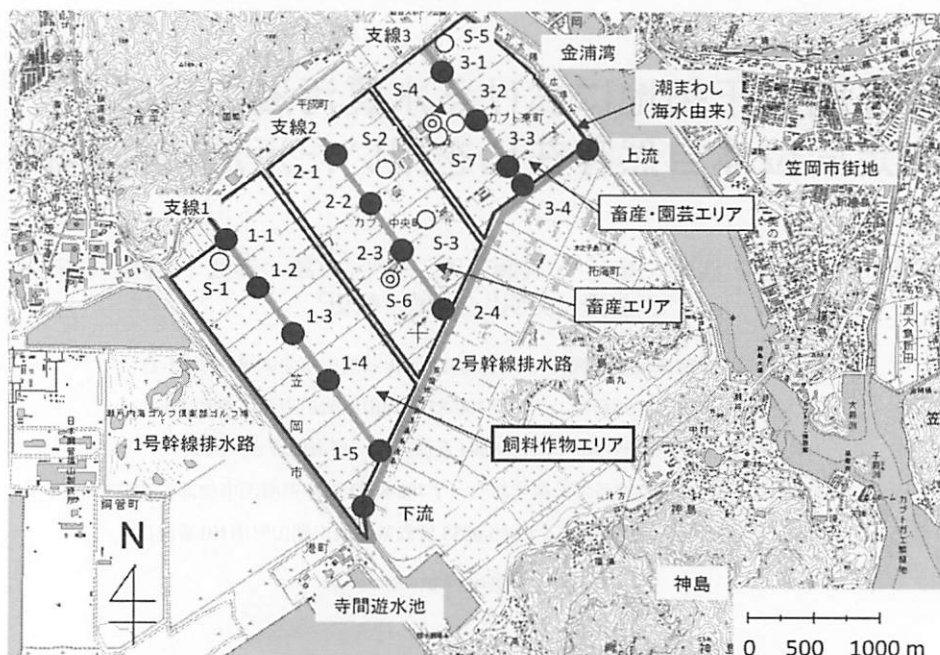


図-1 笠岡湾干拓地の概要と水、土壌、植物の採取地点

(注) ●は水、○は土壌、◎はそれ以外の試料(植物、牛ふん堆肥、牛飼料)の採取地点を示す。

た、水、土壌、植物等に含まれる窒素等の安定同位体自然存在比を分析し、干拓地内の窒素汚濁機構を考察した。

2. 試験方法

(1) 笠岡湾干拓地の概要

岡山県西南端に位置する笠岡湾干拓地には農業用地が1191 haあり、畜産を中心とした農業が営まれている⁹⁾。現在では、畜産農家18戸(176 ha)、耕種複合農家26戸(132 ha)、園芸複合農家49戸(99 ha)が入植しており、それとは別に粗飼料基地381 haが存在している。笠岡気象観測所の気象データによると、過去30年平均年間降水量は1053 mm、平均気温は15.4℃であった¹⁰⁾。土壌型は灰色低地土である。

干拓地内の畑地排水は圃場脇の支線排水路から幹線排水路を経由して寺間遊水池に貯留された後、笠岡湾に排出される(図-1)。東側堤防を浸出した海水(潮まわし)を流入起点に持つ2号幹線排水路に中途流入する支線排水路はほぼ等間隔に3本あり、西から順に、飼料作物栽培圃場(飼料作物エリア、約190 ha)、畜産農家圃場(畜産エリア、約160 ha)、畜産農家圃場と園芸作物圃場(畜産・園芸エリア、約120 ha)の中をそれぞれ流下する。対応する支線排水路を支線1、2、3とした(図

-1)。なお、園芸作物圃場には灌漑用水として、畜産エリアでは畜産用水として、24 km離れた高梁川の水が導入されている。

飼料作物エリアは、イタリアンライグラス、オーチャードグラス、トールフェスク、クローバーの4種混播で5～6年毎に更新されている。年間窒素施肥量は化学肥料として150 kg N ha⁻¹程度と少なく、牛ふん堆肥は更新時のみ50 t ha⁻¹施用されている。畜産エリアはほぼ全域が畜産施設と飼料作物の自家栽培圃場である。畜産エリアと畜産・園芸エリアにある畜産農家では、約5700頭の乳牛、肉用牛が飼育され、年間23380 tの牛ふん堆肥が製造されている。そのうち、7230 tは本研究対象の飼料作物エリアとそれ以外の干拓地内粗飼料栽培圃場(約190 ha)、320 tは干拓地内耕種・園芸農家(研究対象園芸エリアとそれ以外に約230 ha)、2160 tは干拓地外に販売され、5630 tは戻し堆肥として各畜産農家で再び利用されている。したがって、残り8040 tがすべて畜産エリアと畜産・園芸エリア内の畜産農家圃場で栽培する飼料用トウモロコシや牧草に施用されるため、年間平均散布量は60 t ha⁻¹にもなる¹⁾。また、これに加えて、100～300 kg N ha⁻¹の硫酸が年間に施用されている(聞き取り調査)。畜産・園芸エリアには畜産農家圃場が40 haあり、他には、麦類(1作あたりの標準施肥量110 kg N ha⁻¹¹¹⁾、栽培面積43.0 ha¹²⁾)、ブロッコリー(同190～270 kg N ha⁻¹¹³⁾、7.8 ha¹²⁾)、タマネギ(同200～280 kg N ha⁻¹¹³⁾、2.6 ha¹²⁾)、ナス(同

500~600 kg N ha⁻¹¹³⁾, 0.3 ha¹²⁾ 等が露地あるいは施設で栽培されている。

(2) 水、土壌、植物試料の採取

図-1に示す15採水地点で、2009年5月から2010年10月まで約1年半にわたって水質モニタリングを継続した。2010年2月までは2ヶ月に1回、それ以降は毎月1回採水を行った。なお、支線1~3については、-に続けて上流から順に番号を付した。加えて、施設栽培ハウス(S4)に配備された灌漑用取水口から灌漑水を採取した。また、2009年7月に作土を5圃場(S-1~5)から採取した。なお、S-1~3は露地、S-4,5は施設栽培土壌である。同年9月には、S-6の酪農牧場とその飼料用トウモロコシ栽培圃場において、牛飼料、牛ふん堆肥、トウモロコシを採取した。さらに、同年11月には、牛舎に隣接する圃場S-7において、牛舎から約10 m, 80 m離れた地点でオーチャードグラスと作土を採取した。

(3) 分析方法

pHは現地でpHメーター(横河電気, PH82)で測定した。水試料は直ちに冷蔵保存し、実験室に持ち帰った。全窒素、全リン(ペルオキシ二硫酸カリウム分解¹⁴⁾、硝酸態窒素濃度、アンモニア態窒素をオートアナライザー(ビーエルテック, QuAAstro2-HR)で測定した。有機態炭素は未ろ過試料を島津TOC-5000Aで分析した。また、2009年7月13日の試料について硝酸イオンの $\delta^{15}\text{N}$ 値、 $\delta^{18}\text{O}$ 値、全窒素の $\delta^{15}\text{N}$ 値をKobaらの方法⁹⁾で分析した。また、土壌等有機物については、乾燥(土壌は風乾、それ以外は70℃)後に微粉細し、 $\delta^{15}\text{N}$ 値と $\delta^{13}\text{C}$ 値を測定した。同位体分析にはThermoFinnigan製MAT252, FlashEA1112, ThermoFisher製Delta Vを用いた。なお、 $\delta^{15}\text{N}$ 値は次のように定義され、単位は‰である¹⁵⁾。

$$\delta^{15}\text{N} = \left(\frac{(^{15}\text{N}/^{14}\text{N})_{\text{sample}}}{(^{15}\text{N}/^{14}\text{N})_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000 \quad (1)$$

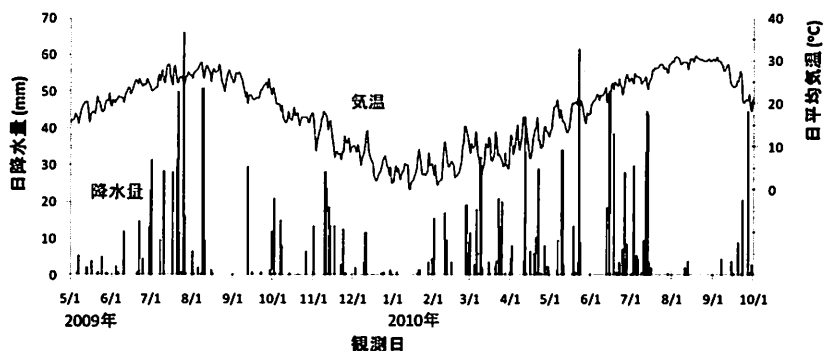


図-2 調査地域における日降水量と日平均気温の推移

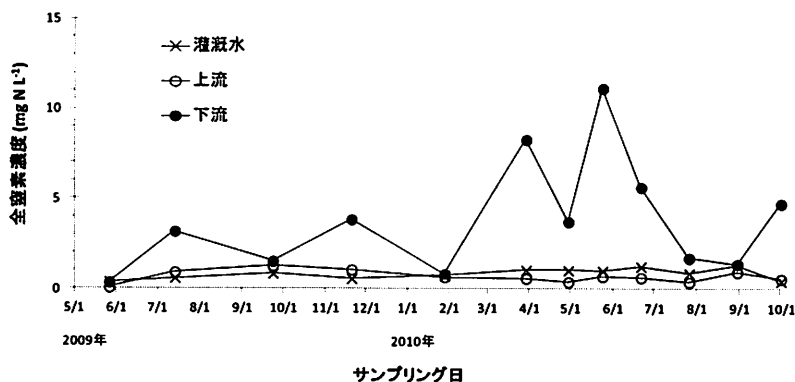


図-3 2号幹線排水路および灌漑水の全窒素濃度

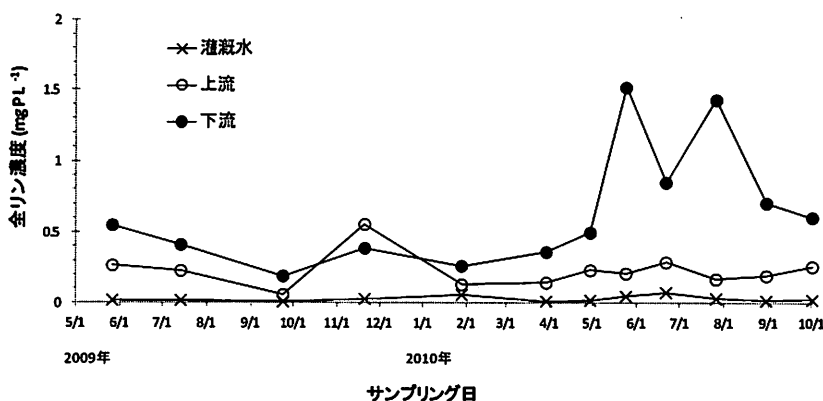


図4 2号幹線排水路および灌漑水の全リン濃度

ここで、 $(^{15}\text{N}/^{14}\text{N})_{\text{sample}}$ は試料の $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 比である。また、窒素の標準物質は大気を用いるため、 $(^{15}\text{N}/^{14}\text{N})_{\text{standard}}$ は大気の $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 比である。 $\delta^{18}\text{O}$ 値、 $\delta^{13}\text{C}$ 値の定義も同様であるが、それぞれの標準物質として平均標準海水 (SMOW)、ベレムナイト (PDB) を用いる¹⁹⁾。

(3) 統計処理

2採水地点あるいは異なる採水時期における算術平均濃度の差は t 検定、多地点間の差はTukey-Kramerの多重比較により、有意差レベル0.01または0.05で検定を行った。なお、図5と図6の各エリアにおいて採水地点間の平均値に有意差がない場合は同一アルファベットで示した。なお、統計解析にはRを用いた¹⁰⁾。

3. 結果および考察

(1) 2号幹線排水路における窒素、リン濃度

図2に同地域の日降水量および平均気温を示す。2号幹線排水路下流 (図-1) では、2010年3月末～6月の全窒素濃度、ならびに2010年6月～10月の全リン濃度は他の時期と比べて有意に高く (図-3, 図-4, t 検定において $p < 0.01$)、全窒素濃度で4～11 mg NL^{-1} 、全リン濃度で0.7～1.5 mg PL^{-1} にも達した。2010年夏は記録的な猛暑であったため、飼料用トウモロコシがほぼ壊滅状態となった。このため、本来トウモロコシに吸収されるべきである肥料および牛ふん堆肥に含まれる窒素、リンが水路に流出したことが理由のひとつとして挙げられる。しかしながら、同地点における全窒素および全リンの全期間算術平均濃度は各々3.8 mg NL^{-1} 、0.6 mg PL^{-1} であり、笠岡湾干拓地水質保全対策検討委員会による1996年～2006年の調査結果²⁾ (全窒素: 3～7 mg NL^{-1} 、全リン: 0.4

～0.7 mg PL^{-1}) とほぼ一致し、本期間が特別に高濃度であったわけではない。

全窒素は上流 (海水由来) と灌漑水でほぼ同レベルであった。一方、全リンは上流で0.2～0.3 mg PL^{-1} と高濃度であり、水源である金浦湾の水質悪化が懸念される。

(2) 支線排水路における窒素、リン濃度

支線排水路の全窒素、全リン濃度は、エリア毎に顕著な傾向を示し、畜産エリア (系列2)、畜産・園芸エリア (系列3)、飼料作物エリア (系列1) の順に高濃度であった (図-5, 図-6)。最下流点の算術平均値で比較すると、全窒素で畜産エリア18.7 mg NL^{-1} 、畜産・園芸エリア7.9 mg NL^{-1} 、飼料作物エリア2.0 mg NL^{-1} でそれぞれに有意な差が認められた (Tukeyの多重比較において $p < 0.01$)。また、全リンにおいても畜産エリア2.6 mg PL^{-1} 、畜産・園芸エリア1.4 mg PL^{-1} 、飼料作物エリア0.2 mg PL^{-1} で有意差があった ($p < 0.01$)。畜産エリアにおける全窒素、全リン濃度は非常に高く、実効的な対策が求められる。

全リンは流下にもともなって濃度が上昇する傾向にあった (図-6)。しかし、全窒素では、最上流が高濃度となる時もあり、一般的な傾向はみられなかった (図-5, $p > 0.05$)。畜産・園芸エリアでは最上流地点 (3-1) で全窒素濃度が最大になることがあった。これは、採水地点近傍の施設栽培圃場から下流の圃場排水よりも窒素濃度の高い排液が流入し、下流で希釈されたためと考えられる。

(3) 排水路における形態別窒素濃度、有機態炭素濃度、安定同位体自然存在比

2009年7月13日採水試料について分析結果を示す (図-7)。畜産エリアおよび畜産・園芸エリアにおいては、

全窒素 (TN) の32~44%が硝酸態であり、残りは有機態であった (図-7a) . 畜産エリアの最下流地点24では 3.1 mg N L^{-1} のアンモニア態窒素が検出された。この付近には酪農家があり、搾乳後の洗浄水であるパーラー排水が流入した直後であった可能性が考えられる。

全窒素と硝酸イオンの $\delta^{15}\text{N}$ 値は同様の傾向を示し、窒素濃度の高い畜産エリア、次いで、畜産・園芸エリアで高い値を示した。堆肥の $\delta^{15}\text{N}$ 値は一般的に高く^{9,20},

本研究における測定値は+9.8‰であった (表1) . このことから、畜産エリア、畜産・園芸エリアで窒素が高濃度であったのは、牛ふん堆肥の多投入が原因であると思われる。畜産農家圃場では推定 60 t ha^{-1} の牛ふん堆肥が施用されている¹⁾。本研究で測定した牛ふん堆肥の含水率 (39.1%) と窒素含有量 (152 g N kg^{-1}) を用いて試算すると、畜産農家圃場における牛ふん堆肥由来窒素の投入量は 555 kg N ha^{-1} にも相当する。

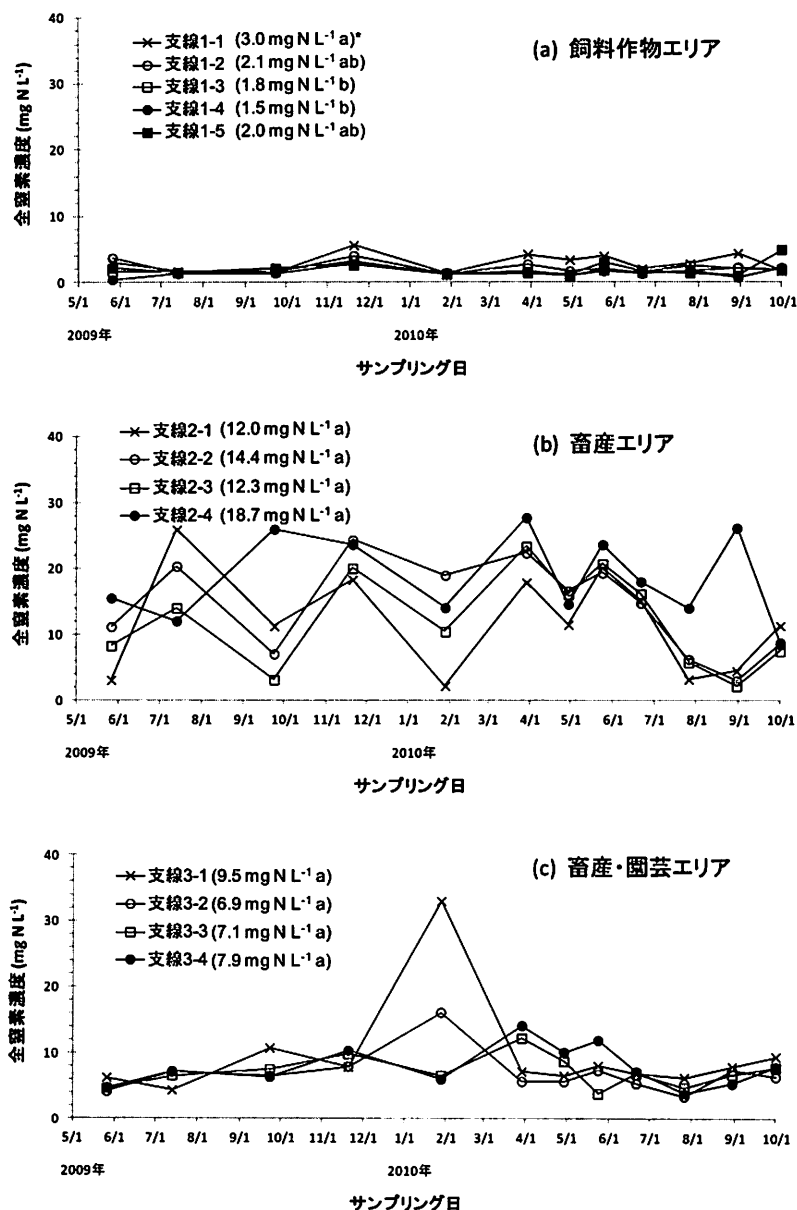


図-5 圃場管理の異なる支線排水路における全窒素濃度

(注) * 凡例の括弧内は算術平均値である。また、各エリアにおいて、同一アルファベットを付した採水地点間ではTukey-Kramerの多重比較において有意差がないことを示す ($p > 0.05$) .

畜産エリアでは、硝酸態窒素が全窒素に占める割合は平均40%であり、硝酸イオンと全窒素の $\delta^{15}\text{N}$ 値はそれぞれ+24.1%と+19.3%であった。したがって、硝酸態以外の窒素の $\delta^{15}\text{N}$ 値は+16.1% $(=(19.3-24.1 \times 0.4)/0.6)$ と算出される。この値は牛ふん堆肥の $\delta^{15}\text{N}$ 値 (+9.8%, 表-1)

よりも大きい。アンモニア揮散時の同位体分別によって土壌に残存する窒素の $\delta^{15}\text{N}$ 値が上昇することはよく知られており^{17,18)}、畑施用された後に牛ふん堆肥からアンモニア揮散が生じたことが示唆される。さらには、硝酸イオンに含まれる $\delta^{18}\text{O}$ 値は畜産エリアと畜産・園芸エ

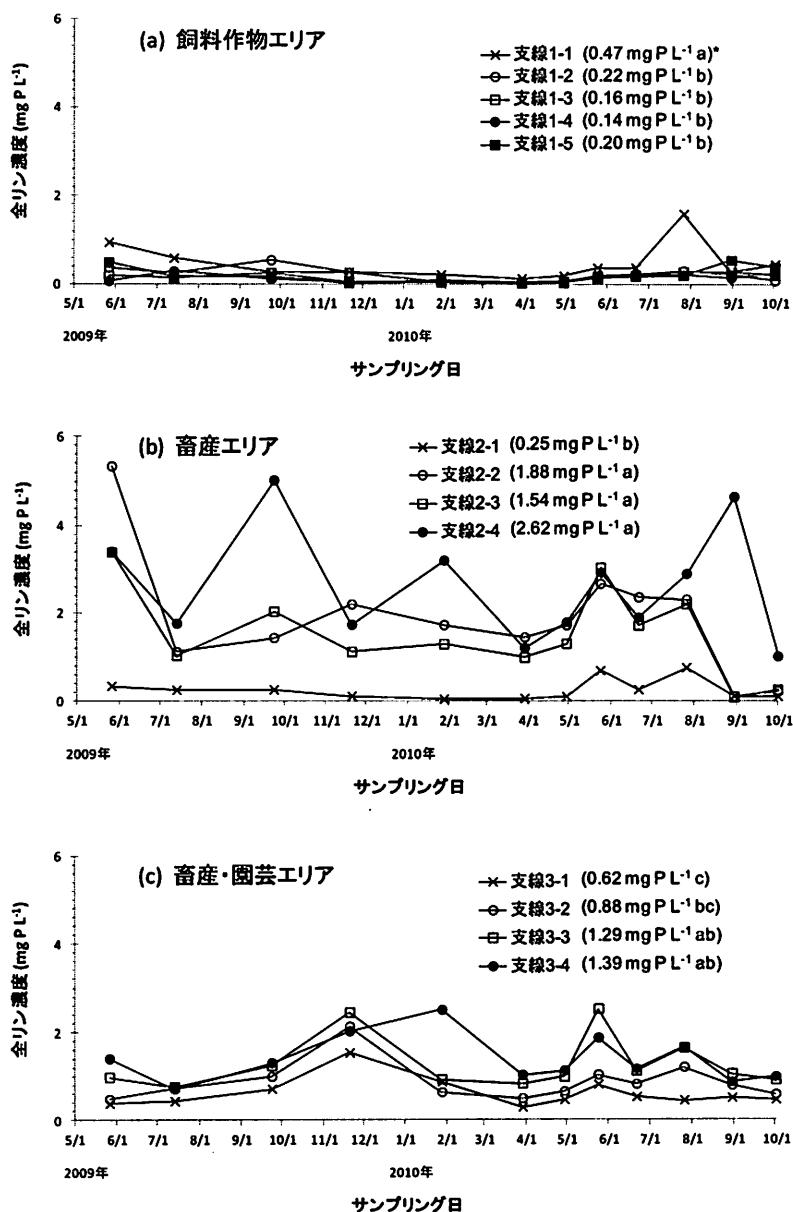


図-6 圃場管理の異なる支線排水路における全リン濃度

(注)* 凡例の括弧内は算術平均値である。また、各エリアにおいて、同一アルファベットを付した採水地点間ではTukey-Kramerの多重比較において有意差がないことを示す ($p>0.05$)。

リアでは同程度で、飼料作物エリアよりも高かった(図-7c)。このことから、圃場内や流出過程あるいは排水路内で脱窒が生じたと推察される。有機態炭素濃度は、畜産エリアで 20 mg CL^{-1} 程度と高く、流下するに従って上昇した(図-7b)。また、飼料作物エリア、畜産・園芸エリアにおいても 10 mg NL^{-1} 前後あり、水路内で脱窒が生じるには十分な濃度であると思われる。なお、pHは全地点でほぼ変化がなく、脱窒にともなうpH上昇は認められなかった。

支線排水路が流入する2号幹線排水路下流では全窒素濃度が 32 mg NL^{-1} であり、寺間遊水池の富栄養化に寄与していると思われる。しかし、 $\delta^{15}\text{N}$ 値、 $\delta^{18}\text{O}$ 値がともに高いことから、2号幹線排水路内での脱窒が示唆される。

(4) 土壌および植物の安定同位体自然存在比

畜産エリアでは、牛ふん堆肥の多量施用を反映して、土壌の全窒素含有量および全炭素含有量が高かった(表-1)。また、 $\delta^{15}\text{N}$ 値も牛ふん堆肥のそれに近い値であった。牛ふん堆肥の $\delta^{15}\text{N}$ 値は、牛の体内代謝やその後のアンモニア揮散の影響を受けて、トウモロコシ、オーチャードグラス、牛飼料より上昇している。飼料作物エリアの $\delta^{15}\text{N}$ 値はほぼゼロであり、化成肥料の影響を強く受けていると考えられる。

牛ふん堆肥の $\delta^{13}\text{C}$ 値はトウモロコシ(C4植物: $-10\sim-12\text{‰}$)、牧草(C3植物: $-25\sim-30\text{‰}$)の中間的な値であり¹⁹⁾、土壌とはほぼ同程度であった。牛飼料と牛ふん堆肥の $\delta^{13}\text{C}$ 値の差は、おがくず等副資材の添加によるものと思われる。

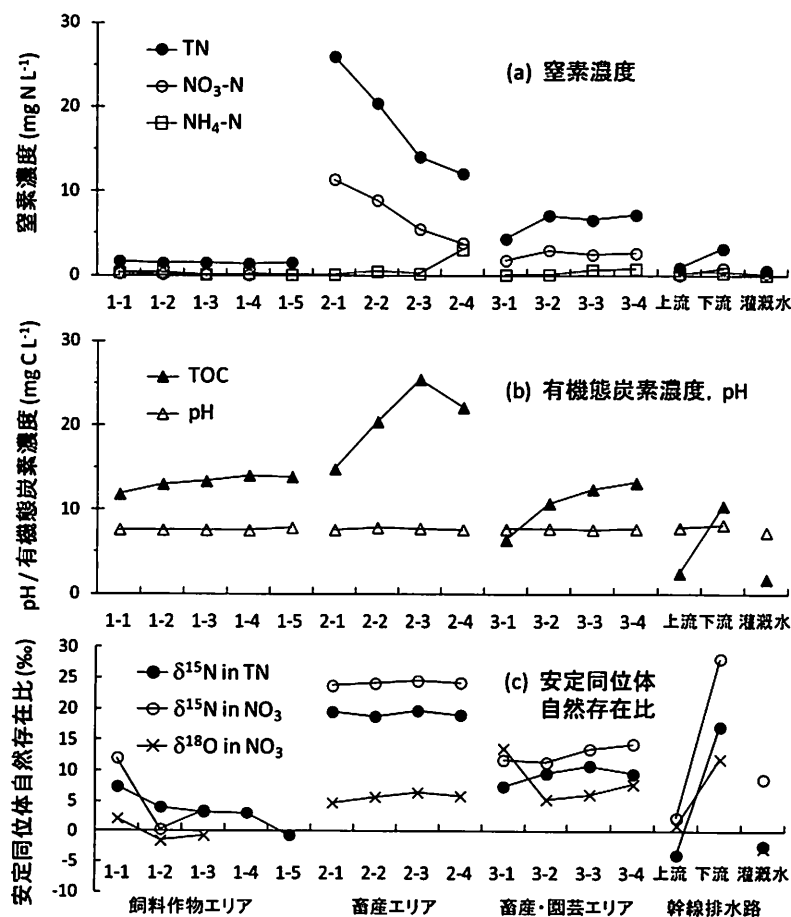


図-7 支線排水路における(a)形態別窒素濃度、(b)有機態炭素濃度、(c)窒素・酸素安定同位体自然存在比

(注) 2009年7月13日採水。

表-1 土壌、植物等の全窒素、全炭素含有量および窒素・炭素安定同位体自然存在比（平均値±標準偏差）

		<i>n</i>	全窒素 含有量 g kgDW ⁻¹	全炭素 含有量 g kgDW ⁻¹	δ ¹⁵ N ‰	δ ¹³ C ‰
土壌		採取地点				
飼料作物エリア	S-1	1	1.1	13	-0.9	-24.5
畜産エリア	S-2, S-3	2	3.7±2.0	44±16	+8.7±3.4	-19.3±3.9
畜産・園芸エリア	S-4, S-5	2	1.4±0.3	19±3	+5.5±3.5	-17.7±6.7
	S-7牛舎 10m	3	1.8±0.3	18±2	-0.3±2.0	-23.6±0.7
	S-7牛舎 80m	3	2.2±0.7	20±7	-5.5±1.2	-24.1±0.5
その他						
牛飼料	S-6	1	25.0	426	-0.9	-18.7
牛ふん堆肥	S-6	1	152	355	+9.8	-24.5
トウモロコシ	S-6	1	21.1	412	+2.2	-12.7
オーチャードグラス	S-7牛舎 10m	3	30.3±1.4	416±2	-8.7±0.5	-28.3*
	S-7牛舎 80m	3	30.0±4.4	424±7	+4.2±0.9	

*1試料についてのみ分析した。

牛舎から約10m離れた地点のオーチャードグラス（検定, $p<0.01$ ）および土壌（ $p<0.05$ ）の $\delta^{15}\text{N}$ 値は80m離れた地点よりも有意に小さかった（表1）。これは、牛舎で発生したアンモニアが恒常的に揮散・沈着しているためと思われる。Frankらの研究¹⁷⁾では、揮散したアンモニアの $\delta^{15}\text{N}$ 値は-28‰と低く、その影響を受けた牧草の $\delta^{15}\text{N}$ 値は-11‰であった。本研究のオーチャードグラスの値はそれに近いものであった。今後は、牛舎から揮散するアンモニアの $\delta^{15}\text{N}$ 値等の解析が必要である。

4. 結論

笠岡湾干拓地内における水質汚濁改善に向けた基礎情報を得るため、支線排水路の窒素、リン濃度を継続的に調査した。その結果、各エリアにおいて下流ほど濃度が上昇する傾向にあるものの、全般的に、畜産エリア>畜産・園芸エリア>飼料作物エリアの順に窒素、リン濃度が高いことがわかった。また、安定同位体自然存在比分析の結果から、畜産エリアおよび畜産・園芸エリアにおける高濃度の窒素は牛ふん堆肥由来であることが示唆された。さらに、これらのエリア内における牛ふん堆肥施用後のアンモニア揮散や圃場あるいは水路内、2幹線排水路内で脱窒が生じている可能性が示唆された。牛舎近傍では土壌およびオーチャードグラスの $\delta^{15}\text{N}$ 値が非常に小さく、牛舎からのアンモニア揮散の影響と推察された。

謝辞：本研究は、JST、CRESTの補助により行われた。

笠岡市役所の永瀬秀雄氏には、現地調査の便宜を図っていただいた。また、同市役所農政水産課からは作物栽培調査のデータをいただいた。この場を借りて感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 竹内重吉：第1章畜産環境問題の現状と本書の分析視点、大規模干拓地における涵養保全型畜産経営, pp. 7-23, 農林統計出版, 2010.
- 2) 笠岡湾干拓地水質保全対策検討委員会：笠岡湾干拓地水質保全検討委員会検討結果の取りまとめ, pp. 75, <http://www.city.kasaoka.okayama.jp/soshiki/3/suisin.html> (2011/5/30 確認), 2008.
- 3) Maeda M., Zhao B., Ozaki Y. and Yoneyama T.: Nitrate leaching in an Andisol treated with different types of fertilizers, *Environmental Pollution*, Vol. 121, pp. 477-487, 2003.
- 4) 田瀬則雄：地下水中の硝酸性窒素濃度と安定同位体存在比—汚染源の同定は可能か—, 水, Vol. 38, pp. 70-78, 1996.
- 5) 平田健正：安定同位体存在比を利用した硝酸性窒素の起源探査, 地下水技術, Vol. 38, No. 8, pp. 49-56, 1996.
- 6) 中西康博, 山本洋司, 朴光来, 加藤茂, 熊澤喜久雄： $\delta^{15}\text{N}$ 値利用による地下水硝酸起源推定法の考案と検証, 日本土壌肥科学雑誌, Vol. 66, No. 5, pp. 544-551, 1995.
- 7) Sigman D.M., Casciotti K.L., Andreani, Barford M.C., Galanter M. and Böhlke J.K.: A bacterial method for the nitrogen isotopic analysis of nitrate in seawater and freshwater, *Analytical Chemistry*, Vol. 73, pp. 4145-4153, 2001.
- 8) Koba K., Inagaki K., Sasaki Y., Takebayashi Y. and Yoh M.: Nitrogen isotopic analysis of dissolved inorganic and organic nitrogen in soil

- extracts, Earth, Life, and Isotopes, Kyoto University Press, pp. 17-36, 2010.
- 9) 笠岡市干拓調整課：笠岡湾干拓地に夢を託して，
<http://www.city.kasaoka.okayama.jp/soshiki/3/>（2011/5/30 確認），2011.
 - 10) 気象庁：防災気象情報，<http://www.jma.go.jp/jma/menu/flash.html>（2011/5/30 確認），2011.
 - 11) 岡山県良質麦生産振興推進協議会：頑張れ！岡山の麦づくり～岡山県良質麦生産振興方針～，岡山県農林水産部生産流通課，pp.119,2008.
 - 12) 笠岡市役所建設産業部農政水産課：笠岡湾干拓地内作物栽培調査（2009年5月）資料，未公表.
 - 13) 岡山県：野菜栽培指針，岡山県農業総合研究センター，pp. 252,2001.
 - 14) 日本分析化学会北海道支部：水の分析，第5版，pp.307-331，化学同人，2005.
 - 15) 米山忠克：土壌－植物系における炭素，窒素，酸素，水素，イオウの安定同位体自然存在比：変異，意味，利用，日本土壤肥科学会雑誌，Vol. 58, No. 2, pp. 252-268, 1987.
 - 16) R Development Core Team: R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org>（2011/8/30 確認），2008.
 - 17) Frank D. A., Evans R. D. and Tracy B. F.: The role of ammonia volatilization in controlling the natural ^{15}N abundance of a grazed grassland, *Biochemistry*, Vol. 68, pp. 169-178, 2004
 - 18) Handley L. L. and Raven J. A.: The use of natural abundance of nitrogen isotopes in plant physiology and ecology, *Plant, Cell and Environment*, Vol. 15, pp. 965-985, 1992.

(2011.5.30受付)

Stable Isotope Analysis of Water Contamination in Reclaimed Farmland Areas of Kasaoka Bay

Morihiro MAEDA¹, Yuichi ASANO¹, Fujio HYODO², Yasuhiro NAKAJIMA³,
Taku FUJIWARA⁴, Hideaki NAGARE¹ and Satoshi AKAO⁵

¹Graduate School of Environmental Science, Okayama University

²Research Core for Interdisciplinary Sciences, Okayama University

³National Institute for Agro-Environmental Sciences

⁴Agriculture Unit, Research and Education Faculty, Kochi University

⁵Graduate School of Engineering, Tottori University

Nitrogen (N) and phosphorus (P) concentrations have been reported to be high in the main drainage canals in the reclaimed areas of Kasaoka Bay, where livestock farming is the most common form of agriculture. In the present study, water quality was monitored bimonthly from May 2009 to February 2010 and monthly from March to October 2010 at four or five sites in each of three branch canals running through farmland areas with different uses: (i) grassland, (ii) livestock and forage crops, and (iii) livestock, forage crops and horticulture. Concentrations of total N and P in water were higher for land use in the order of (ii) livestock and forage crops > (iii) livestock, forage crops and horticulture > (i) grassland. We also investigated the mechanism of N contamination by analyzing stable isotopes in drainage water, soil plots in all areas, and forage crops in area (ii). Abundances of natural fractions of ^{15}N ($\delta^{15}\text{N}$) and ^{18}O in nitrate-N indicated that N contamination in canals could be attributed to the high rate of manure compost application on fields of forage crops owned by livestock farmers in areas (ii) and (iii) and the fact that ammonia volatilization and/or denitrification occurred in the fields and/or in the canals. Further, ammonia volatilization from a cowshed was inferred based on significantly lower $\delta^{15}\text{N}$ values in orchard grass and soil in plots closer to the cowshed. The present study indicates that excess application of manure compost causes N contamination of water and that ammonia volatilization from livestock affects soil N in reclaimed land.