

豚舎汚水の窒素対応技術の展望

(独)農研機構 畜産草地研究所
畜産環境研究領域 上席研究員

田中 康男

はじめに

豚舎汚水処理における窒素除去の重要性と、基本的な対策法については、すでに「畜舎汚水浄化処理施設窒素対応管理マニュアル」(畜産環境整備機構)に詳細が紹介されている¹⁾。

本稿では、実用段階の技術から、開発中、アイデア段階、さらには将来の夢ともいえるべき技術までを網羅し、窒素対応技術の概要を紹介したい。

1. 飼料による窒素の発生抑制

汚水処理での除去を考える前に、汚水処理に流入する窒素を低減させる取り組みも、元を断つという意味で重要である。この観点から、アミノ酸添加低CP飼料による排せつ物中窒素量低減技術は、今後の普及が期待される²⁾。

2. 物理化学的な窒素除去技術

ーゼオライトを例に

アンモニアの物理化学的な除去法としては、アルカリ剤で揮散させるアンモニアストリッピング法、塩素剤で窒素ガスにして揮散させるブレイクポイントクロ

リネーション法もあるが、比較的簡易な手法としてはゼオライト吸着法がある。

ゼオライトは、所要量を添加すれば確実なアンモニア低減効果を発揮する。しかし、ゼオライトは単価が高いことから、生物処理で取り切れない窒素分を除去するという使い方が現実的と思われる。ゼオライト吸着法のメリットとしては、使用後のゼオライトを土壤に施用すれば、吸着したアンモニアが硝化されて土壤に移行し肥効成分として寄与することである。また、ゼオライトも土壤改良資材としての効果を有するので無駄にはならない。

畜産分野でのゼオライトの実用例は、ほとんど無いが、生物処理後の高度処理で土壤ろ過を行う際に、土壤層の下部にゼオライト層を設け、土壤層で吸着しきれなかったアンモニアを除去した例が報告されている³⁾。また、養豚汚水の嫌気性処理の前処理として、ゼオライトによるアンモニア除去を検討した事例もある⁴⁾。この報告によれば、ゼオライトにコストがかかるものの、アンモニアを肥料化できるメリットもあるので現実性があると

考察している。

鶏糞炭も製品によってはアンモニア吸着能があるが、逆にリンが溶出してくることから、汚水処理の前処理として利用できるかどうかは今後の検討課題である。

3. 微生物による窒素除去技術

(1) 汚水中有機物による脱窒

1) 脱窒のしくみ

処理施設へ流入する汚水中の窒素は、大部分がアンモニア態である。このアンモニア態窒素を、微生物の作用で除去するには、まず好気性条件で硝化細菌を利

用して硝酸または亜硝酸に酸化する。次に、嫌気性条件で汚水中の有機物と接触させ、脱窒細菌の作用で硝酸・亜硝酸を窒素ガスにして空気中に揮散させる(脱窒)。

2) 脱窒方法

このように、好気性条件と嫌気性条件を適切に組み合わせることが、微生物による窒素除去のキーポイントである。如何に効率よく組み合わせるかで、種々の手法が開発されている。代表的な手法は、循環法と間欠曝気法である。

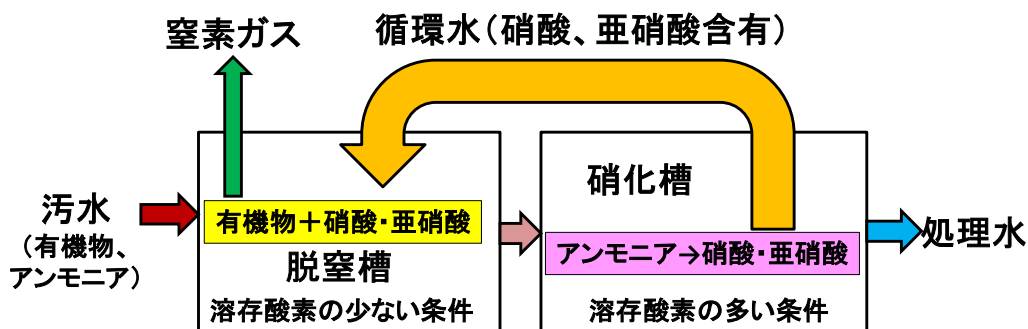


図1 循環式脱窒法

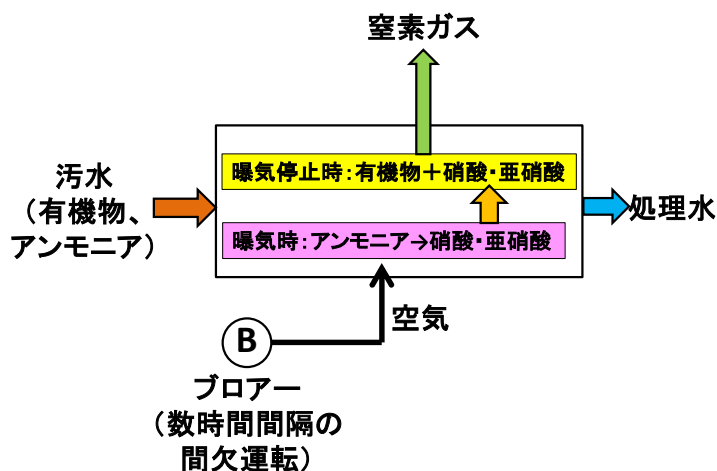


図2 間欠曝気式脱窒法

循環法(図1)は、汚水が流入する最初の槽を嫌氣的にし、次段の槽は好氣的にして硝化を進める。硝化された液は嫌気槽に循環させ、ここで流入汚水中の有機物と接触させ脱窒を進める。

間欠曝気法(図2)は、曝気と曝気停止を交互に繰り返すことで、曝気時に硝化、曝気停止時に脱窒を進める。

3) 課題

窒素に対する汚水中有機物の相対量が十分高ければ、これらの手法を導入することで十分な脱窒が進む可能性がある。一般的に、流入汚水中の窒素濃度に対するBOD(分解しやすい有機物の指標)濃度の比(BOD/N比)が5以上であれば、十分な脱窒が期待できる。しかし、畜舎汚水では、この比が3以下になる場合も多い。そのような場合は、循環法や間欠曝気法を導入しても、硝酸・亜硝酸が残留することになる。残留量が規制値を超える場合、以下に述べる各種脱窒法の付加が必要になる。

(2) 液状資材添加による脱窒

1) メタノールの利用

①特徴

畜産以外の産業廃水処理の分野で一般的に利用されているのは、脱窒用有機物としてメタノールを添加する方法である。メタノールが利用される理由としては、脱窒反応に利用されやすいことと、比較

的安価なことが挙げられる。1gの硝酸性窒素除去のためには、2.47gのメタノールが必要である(図3)。メタノールは、曝気工程の後段の嫌気工程で注入されて、硝酸イオンと反応し脱窒に利用される。メタノールが残存する場合、そのまま放流水に含まれるとBODを高めてしまうことから、再曝気工程で微生物分解する。このため、メタノール添加法を導入するためには、メタノールを安全に貯留する設備、メタノール注入装置、脱窒用嫌気槽、再曝気槽等の設置が必要になる。

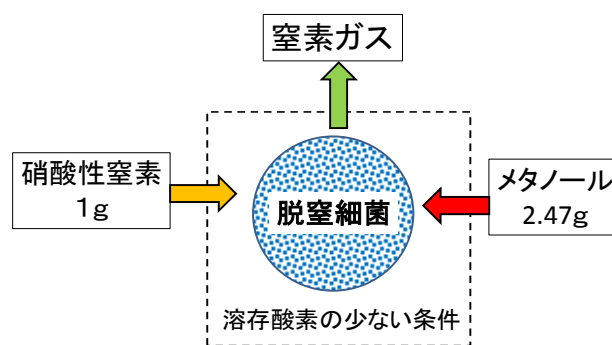


図3 メタノールを利用した脱窒

②課題

メタノール添加法を効率的に実施するには、排水中の硝酸濃度を把握して適正な添加量に制御することが重要である。硝酸濃度に比べて過剰のメタノールを添加すると経費が無駄になる。しかし、硝酸濃度の測定を頻繁に行ってメタノール添加量を調製することは、現実的に困難であり、余裕をみた量を添加せざるをえ

ないのが実情である。

2) 各種有機性廃液の利用

メタノール以外にも、缶詰工場の廃シロップ⁵⁾や焼酎粕⁶⁾などの有機性廃液や、バイオディーゼル燃料製造の副生成物である廃グリセリンを利用する検討もなされている⁷⁾。このような資材が近隣で入手できる場合は、効果的な選択肢と思われる(表1)。

表1 脱窒への利用が検討された有機性廃棄物の事例

種類	入手先	BOD濃度
廃シロップ	缶詰工場	48,000mg/L
焼酎蒸留廃液	焼酎工場	6,000~20,000 mg/L
廃グリセリン	バイオディーゼル工場	90万~100万 mg/L
豚ふんスラリー	豚舎	—

さらに、畜舎で分離した豚ふんに加水してスラリー状にしたものを脱窒用有機源として利用する検討もなされている⁸⁾。この場合、経営内で有機物を賄えるので、労力および経済面でのメリットが期待されるが、ふんは、リンを多く含むことから、処理水中のリン濃度が高まるという影響が生ずる。リンの放流規制値の厳しい地域では、この点がネックになる。

窒素関連の規制が緩やかであった時代には、汚水中へのふんの混入率はできるだけ小さくして、BODを下げ、汚水処理を楽にするのが常識であった。しかし、

窒素の低減も求められるようになると、流入BODの下げ過ぎは不利になる。従来常識の変更を迫られていると言えよう。

3) チオ硫酸ナトリウムの利用

メタノールや有機性廃液の代わりに、チオ硫酸ナトリウム溶液を利用することもできる⁹⁾。チオ硫酸イオンは、無酸素条件下で硫黄酸化細菌により硝酸と反応し、硫酸イオンに酸化され、一方硝酸イオンが窒素ガスに還元される。この反応は、後述の固形硫黄を利用する脱窒とほぼ同様である。

チオ硫酸ナトリウムは、引火性なども無く安定で、観賞魚の飼育において水道水の塩素除去利用されるほど無害で、しかもメタノールや有機性廃液のようにBODを高めることもない。このため、利用しやすい脱窒資材といえる。ただし、チオ硫酸を利用して脱窒する細菌を増殖・保持するための担体充填型リアクターが必要になる。また、単価が高いため、添加量を必要最小限に抑えることが重要であり、添加量の自動調節手法の確立が課題である。

4) 液状物添加脱窒における添加量制御手法

上記のような液状資材を脱窒に利用する場合、適正添加量の自動制御を行うことが望ましい。金は、回分式活性汚泥法による脱窒プロセスにおいて、pHと酸化還元電位の変化に応じて液状有機物添加

を自動制御するシステム(リアルタイム制御法)を検討した⁸⁾。このシステムでは、測定データの絶対値ではなく、値の変化の変曲点をソフトウェアで認識し、添加の開始および終了時点を決めるのが特徴である。pH、酸化還元電位等の測定では、センサーの特性の変化により測定値が徐々にずれるのが通例であるが、変曲点の出現タイミングは変化しないので、正確な制御が可能になる。この手法が実用化されれば、メタノール、有機性廃液、チオ硫酸ナトリウムなどの添加の際に、必要最低限の添加が実現される可能性がある。

(3) 固形資材を利用した脱窒法

1) 市販脱窒用硫黄資材の利用

液状物の共通の課題である適正添加量の制御をどう行うかという問題を回避する簡易な手法として、固形硫黄を利用する硫黄脱窒法がある。固形硫黄による脱窒の反応は、**図4**のとおりである。硫黄だけを投入すると、硫黄脱窒に伴う硫酸イオンの生成により、処理水が酸性化してしまう。そこで、市販資材では硫黄と炭酸カルシウムが混合されペレット状に成形されている。このような資材を水槽に投入し、硝酸又は亜硝酸を含んだ液を流入させると、通常数週間で資材の表面に硫黄酸化細菌が増殖し、脱窒が進むようになる。

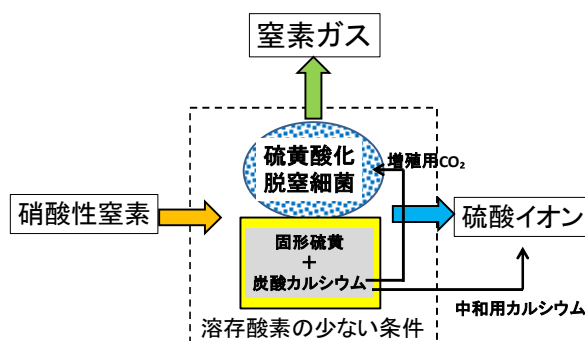


図4 市販硫黄脱窒資材を利用した脱窒

硝酸、亜硝酸の流入量に応じて反応が自然に進むので、面倒な調整無しに脱窒を行うことが可能である。資材は硝酸または酸素に触れない限り不溶なので、空気との接触さえ避ければ、無駄に消耗することはない。

市販硫黄資材を利用した脱窒は、すでに、溶液栽培廃液の処理に関する試験事例¹⁰⁾、また韓国では工場廃水や埋立地浸出水等の処理などへの実施例¹¹⁾がある。

畜産分野での試験事例も多いが^{12, 13, 14, 15, 16)}、畜産排水に適用する場合、排水中の懸濁物が資材層に捕捉され、資材層が閉塞し性能低下が生じやすい。このため、前処理用の懸濁物除去装置の付加を試みた例もある。また、前処理を省く代わりに、定期的な逆洗操作を選択した事例も有る。逆洗方式に適した資材も開発されたが^{17, 18)}、資材メーカーの方針転換により、実用化には至らなかった。

2) 粉末硫黄の利用

上記のような、市販の硫黄脱窒用資材は、利用しやすい反面、単価や供給面で、メーカー主導に傾きやすい。低コストで、かつメーカーの対応に影響されずに硫黄脱窒を行うため、粉末硫黄を利用した手法(図5)も検討されている。

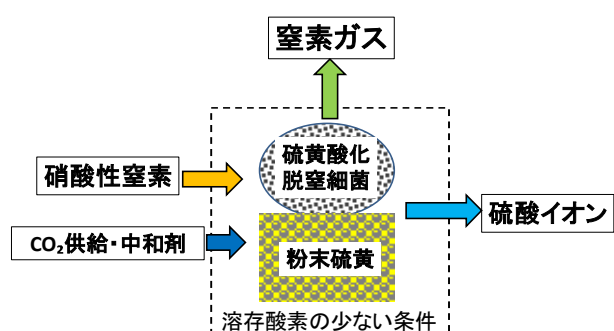


図5 粉末硫黄を利用した脱窒

粉末硫黄は、石油の脱硫プロセスからの副産物として大量に発生していることや、農業資材として流通している製品もあるので、汎用的で入手が容易と考えられる。ただし、粉末硫黄は水になじみにくく、そのまま投入しても水面上に浮上し、装置から流出してしまう。しかし、家庭用中性洗剤溶液に一旦浸漬してから投入すると、水に馴染み、利用可能となる¹⁹⁾。粉末硫黄による脱窒については、すでに養豚農家での実証試験も行われており²⁰⁾、簡易な手法として期待される。

なお、排水中の硝酸濃度によっては、硫黄酸化細菌の増殖に必要な炭酸の供給と脱窒後の中和のために、適切な薬剤の

添加が必要となる。また、槽内の硫黄層は徐々に圧密し、固液接触が不十分になることから、定期的な攪拌により硫黄層を一時的に流動させるのが効果的である。

純粋な固形硫黄は消防法において危険物(可燃性固体)に該当し、一か所に指定数量である100kg以上を貯蔵することは禁じられているので、未使用品の多量貯蔵は避ける必要がある。

3) 生分解性プラスチックの利用

固形有機物も脱窒に利用できる可能性がある。その一例として、生分解性プラスチックの利用の可能性が示されている。山田らによると²¹⁾、生分解性プラスチックを用いる利点として、①徐々に溶解していくため一定の濃度の還元力を長期間にわたって供給できる、②メタノールなどの有害物質の残留物による二次的有機物汚染のリスクを軽減できる、③メタノールなどの液状物の添加の場合に必要なポンプや貯留タンク等の付帯設備が不要、という3点を挙げている。今後、生分解性プラスチック廃棄物が大量に発生し、安価に入手できるようになれば実用性が出てくる可能性がある。

4) セルロースの利用

生分解性プラスチックと同様な利点を有する、固形有機資材としては、セルロースも候補となる。シュレッダーで細片化した新聞古紙を充填した脱窒リアクターの研究事例もある²²⁾。容易に入手でき、

しかも脱窒に利用されやすい性状の紙の選択と、その効率的利用に適したリアクターの開発が実用化のカギになる。

(4) 資材不要の脱窒法

有機物や硫黄による脱窒とは代謝経路が全く異なるアナモックス細菌を利用した脱窒も、多くの分野で研究開発が進められている。アナモックス細菌の脱窒反応では、アンモニアと亜硝酸が反応して窒素ガスとして揮散する(図6)。亜硝酸は、前処理で硝化反応を進めることで形成させる。

汚水中の窒素成分だけで脱窒が進むため、薬剤は不要である。また、アンモニアの半量だけを亜硝酸まで硝化すれば良いので、硝化に必要な曝気動力も大幅に節減できる。

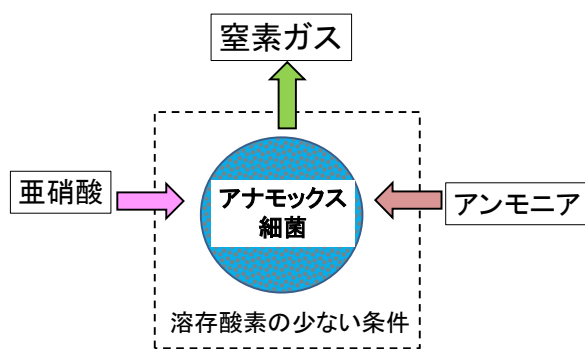


図6 アナモックス法による脱窒

以上のように利点の多い手法ではあるが、アナモックス菌の増殖は大変遅い上に、処理に十分な量まで増殖させるため

には微妙な条件が必要なこともあり、安定した処理の実現は今後の課題である。また、前処理で亜硝酸とアンモニアの比率を適切な値にするための微妙な制御も必要である。これらの難しさもあるため、今後の展開が期待されるものの、畜産分野での現実的な選択肢になるかどうかは、まだ判断できない。

終わりに

畜産への苦情原因のトップは、相変わらず悪臭問題であり、この面の対応は畜産経営の重要課題である。悪臭抑制には多様な手法があるが、畜舎については洗浄の強化、堆肥化については脱臭装置の設置などが基本的な対策となる。しかし、洗浄を強化すれば汚水発生量は増大し、脱臭装置を設ければアンモニアを高濃度に含む廃液が発生する。これらは、污水浄化施設への窒素負荷の増大をもたらす。一方では、放流水への窒素規制は強化の方向にあり、今後一層の窒素対応の高度化が求められる。すなわち、窒素については、流入は増える一方で出口はますます狭められるという事態が進行しつつある。この変化に対応し、乗り切る努力が今後不可欠である。

最後に強調したい点は、本稿で紹介した各種窒素除去技術が効果を発揮するには、既存の処理施設がきちんと管理され、正常な処理が行われていることが前提条

件という点である。場合によっては、既存施設の管理を改善するだけで水質が格段に向上し、特段の付加技術が不要な場合もあり得ると思われる。

すでに畜産環境整備機構から公表されている汚水処理施設管理マニュアルを一助としつつ適切な管理の努力がなされることを期待して稿を終える。

参考文献

- 1) 畜産環境整備機構(2013) 畜舎汚水浄化処理施設窒素対応管理マニュアル
畜産環境技術研究所 検索
- 2) 杉中 求(2013) 飼料からの畜産環境対策—環境負荷低減飼料を利用した窒素・リン排せつ量の低減. 畜産環境情報, 49号: 1-10. 畜産環境情報 検索
- 3) 佐賀県農林部畜産課、佐賀県畜産試験場(2001) 汚水処理技術マニュアル「家畜排せつ物処理技術実用化調査事業」. 佐賀県.
- 4) Cintoli, R., Di Sabatino, B., Galeotti, L. and Bruno, G. (1995) Ammonium uptake by zeolite and treatment in UASB reactor of piggery wastewater. *Water Science and Technology*. 32: 73-81. (豚舎汚水のUASBリアクター処理におけるゼオライトによるアンモニア除去)
- 5) 長崎県畜産試験場(2005) 回分式活性汚泥浄化処理における缶詰シロップ廃液の窒素除去促進効果. 平成17年度九州沖縄農業研究成果情報.
- 6) 大分県、日鉄環境エンジニアリング株式会社(2007) 焼酎製造廃液を利用した家畜舎からの汚水の生物学的浄化処理方法. 特願2007-111923.
- 7) 向吉郁朗、西和枝、西本研了(2009) 廃グリセリンを用いた脱窒処理. 鹿児島県工業技術センター研究報告, 23: 23-27.
- 8) 金主鉉(2002) リアルタイム制御による畜舎排水の高度窒素除去, 第44回日本水環境学会セミナー硝酸・亜硝酸性窒素汚染対策に向けた新たな展開, 76-86.
- 9) 長谷川輝明、田中康男(2012) チオ硫酸ナトリウムを利用した畜産排水の窒素低減技術. 日本畜産環境学会会誌, 11:46-55.
- 10) 静岡県農業水産部研究調整室(2003) イチゴ高設栽培における排液処理(窒素除去). あたらしい農業技術 No.391.
- 11) 新日鐵化学(株)技術開発本部開発企画部編(2004) 硫黄カルシウム剤による脱窒法. 化学工業日報社.
- 12) 陳昌淑, 田中康男(2001) 硫黄酸化反応による畜舎汚水の窒素除去と脱色. 用水と廃水, 43: 1053-1059.
- 13) 陳昌淑, 田中康男(2001) 硫黄充填反応槽を用いた嫌気性処理後の畜舎汚水の窒素除去と脱色. 日本水処理生物学会誌, 37: 93-98.
- 14) 和波一夫、嶋津暉之、羽田野一幸、谷田

- 貝敦(2006)畜産汚水を対象とした高度処理に関する研究. 東京都環境科学研究所年報 2006、144-149.
- 15) 和波一夫、嶋津暉之、羽田野一幸、谷田貝敦(2007)畜産汚水を対象とした高度処理に関する研究—硫黄酸化細菌による窒素除去等—. 東京都環境科学研究所年報 2007、85-93.
- 16) 長峰孝文、小堤恭平、古谷修(2008) 硫黄酸化脱窒による豚舎汚水の活性汚泥処理水の脱窒と脱色. 日本畜産環境学会誌、7(1): 16.
- 17) Tanaka, Y., Yatagai, A., Masujima, H., Waki, M., Yokoyama, H. (2007) Autotrophic denitrification and chemical phosphate removal of agro-industrial wastewater by filtration with granular medium. *Bioresource Technology*, 98: 787-791.
(粒状資材による農産工業廃水の脱窒と脱りん)
- 18) 田中康男、手島信貴、篠崎秀明、谷田貝敦、横山浩、荻野暁史(2009) 硫黄・炭酸カルシウム含有粒状資材と軽量発泡コンクリート粒状資材を使用した2段式処理による豚舎排水の脱窒・リン低減. 日本水処理生物学会誌、45(4):165-175.
- 19) 田中康男、長谷川輝明、杉本清美、山下恭広(2013) 硫黄酸化脱窒細菌による畜舎排水窒素除去への微粉末硫黄の利用可能性. 日本畜産学会報、84:383-388.
- 20) 長谷川輝明、杉本清美、山下恭広、田中康男(2013) 土壌 pH 調整用粉末硫黄を利用した畜舎排水の脱窒処理実証試験. 日本畜産学会報、84:459-465.
- 21) 山田剛史・吉川成志・片山傳喜・平石明(2013) 生分解性プラスチックを利用した生物学的脱窒処理技術. 排水・污水处理技術集成 vol.2, pp113 - 120. エヌ・ティー・エス, 東京.
- 22) Volokita, M., Belkin, S., Abeliovich, A. and Soares, M.I.M. (1996) Biological denitrification of drinking water using newspaper. *Water Research*. 30:965-971.
(新聞古紙を利用した飲用水の生物学的脱窒)



参考写真1 脱窒用粉末硫黄(土壤pH調整用の市販品)



参考写真2 粉末硫黄を利用する脱窒装置の一例