

# 硝酸性窒素等の規制強化に対応する浄化処理技術

田中 康男

(一般財団法人畜産環境整備機構 畜産環境技術研究所)

## 1. はじめに

汚水処理は多くの養豚農家にとって必要不可欠であり、微生物を活用する活性汚泥法という浄化法が普及しています。活性汚泥法は、大規模な下水処理場でも活躍している優れた処理技術ですが、こまめに調整しないと本来の性能が発揮されない難しさも有ります。その上、近年は窒素関連の水質規制強化の動きがあり、窒素除去の原理を理解した上での綿密な運転調整の重要性が増してきています。

一方で、多くの養豚農家は飼養管理作業で忙しく、汚水処理施設の調整まで手が回りにくい状況で、汚水処理対応は頭の痛い問題になっています。

以上のような背景を受けて本稿では、窒素除去の基本と今後の対応の方向性を考えてみたいと思います。

## 2. 硝酸性窒素等とは？

平成 13 年に、水質汚濁防止法に「アンモニア、アンモニウム化合物、亜硝酸化合物及び硝酸化合物」という水質項目が有害物質に追加されました。名称が長いので「硝酸性窒素等」と略されることが多く、本稿でもこの略称を使います。この項目の濃度は以下の計算式で求めることが決められています。

$$\text{硝酸性窒素等 (mg/l)} = \text{NH}_4\text{-N} \times 0.4 + \text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$$

この規制が導入される以前から、全窒素（無機態と有機態の窒素の総計）が、水中の植物プランクトンを過剰に増殖させる原因物質であるという観点で、排水量 50 m<sup>3</sup>/日を超える農家に限って規制されていました。

これに対し、硝酸性窒素等は、乳幼児が摂取すると有害という観点から、排水量にかかわらずに規制が適用されています。このため、畜産に対する影響は格段に大きいと言えます。

硝酸性窒素等の一般基準値は 100 mg/l ですが、畜産農業については対応の困難性が認められ、暫定基準が適用されてきました。暫定基準値は当初 1500 mg/l でしたが、段階的に強化され 2018 年現在では 600 mg/l となっています（図 1）。暫定基準値は 3 年ごとに見直され、次の見直しは平成 31 年 7 月に予定されています。規制開始から 17 年経過し、暫定基準値が今後どのように推移するかは予断を許さない状況です。

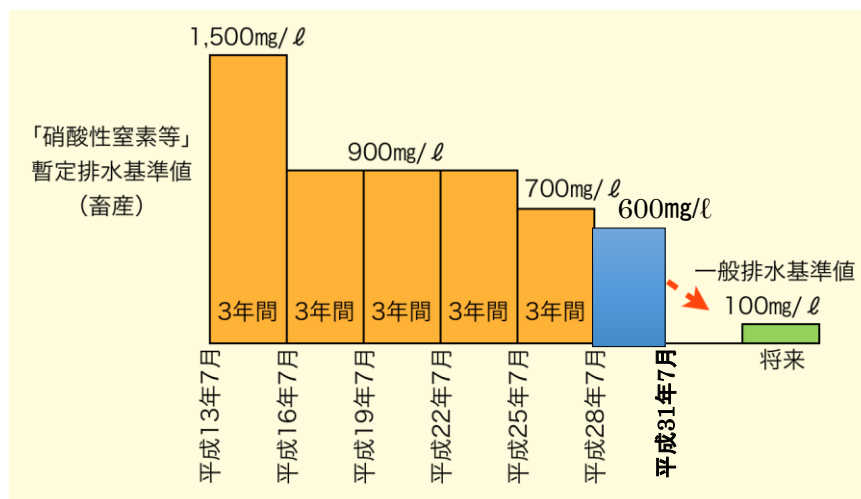


図1. 水質汚濁防止法による「アンモニア、アンモニウム化合物、亜硝酸化合物及び硝酸化合物」の暫定基準値の推移

### 3. 硝酸性窒素等の排出実態

養豚からの放流水中硝酸性窒素等の実態を、環境省によって公表された集計資料で見ると、一般基準値の 100 mg/ℓ未満であった試料の割合は 2016 年時点で約 65%になっています。

一方、畜産環境技術研究所が年間にわたって水質調査を行った 7 戸の養豚農家の調査結果では、通年で 100 mg/ℓをクリアしたのは 1 戸のみで、その他はいずれも 100mg/ℓをクリアする時もあったものの、最大値は約 250mg/ℓから 750mg/ℓ（この農家では処理水を圃場散布）と高い値でした（図2）。このような大きな変動幅が養豚排水の特徴と考えられます。

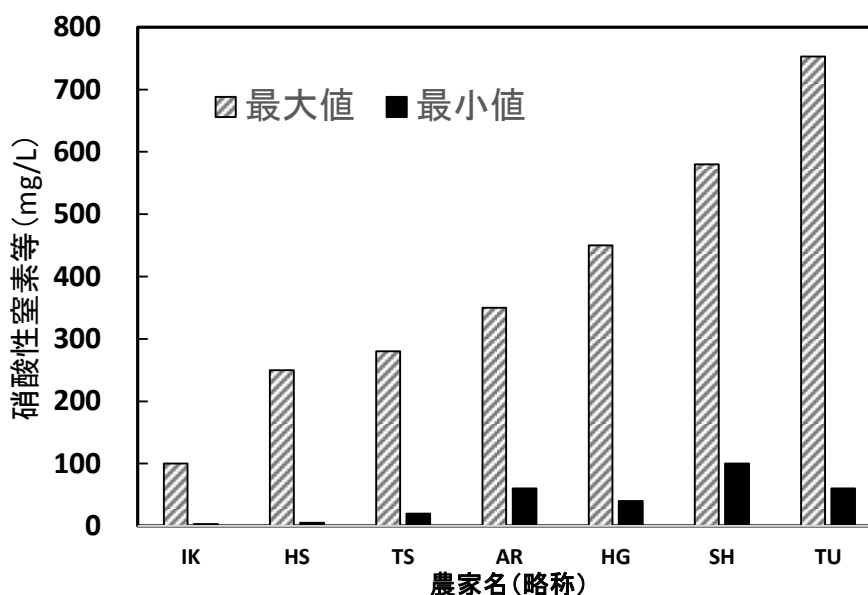


図2. 7 戸の農家における硝酸性窒素等の最少および最大値

7 農家中で最も変動の大きかった TU 農場での変化の詳細をみると、夏期に低く冬期に顕著に高まる傾向が見られました（図 3）。TU 農場は代表的窒素除去法である循環式硝化脱窒法が導入されており、汚泥脱水も確実になされています。それでもこのように激しい季節変動が生ずることは窒素対応の難しさを物語るものと言えます。

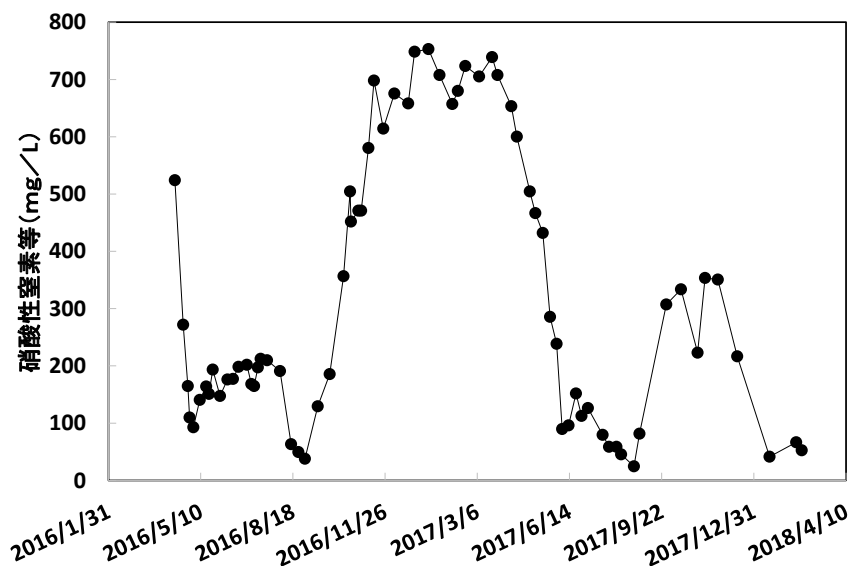


図 3. TU 農場における処理水中硝酸性窒素等の変化

#### 4. 窒素除去の原理

窒素除去技術について考えるための基礎知識として、まず汚水中の窒素成分の除去メカニズムを見てみましょう。

汚水中の窒素成分の大部分はアンモニアです。窒素除去の第一段階では、十分に通気して硝化菌を活性化し、アンモニアを亜硝酸または硝酸に酸化します（硝化工程）（図 4）。

### 硝化：窒素除去の最初のステップ

好気条件で硝化菌が活躍

アンモニア  
(NH<sub>3</sub>)

+

酸素  
(O<sub>2</sub>)

→

亜硝酸NO<sub>2</sub>  
硝酸NO<sub>3</sub>

最も大事なことは十分な曝気と水温。冬でも15℃以上を保てるようにしてください。

図 4. 窒素除去の第一段階：硝化工程

次に、通気せずに溶存酸素を低くした条件で脱窒細菌を利用し、亜硝酸・硝酸を有機物と反応させ窒素ガスとして、空気中に揮散させます（脱窒工程）（図 5）。

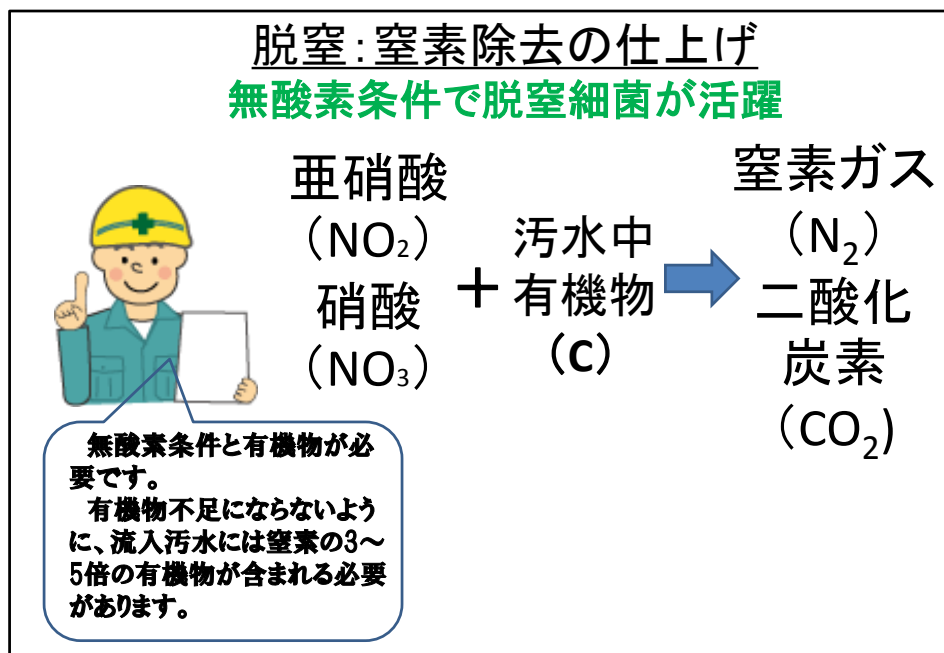


図 5. 窒素除去の第二段階：脱窒工程

このように、窒素を除去するためには、全く異なる 2 つの条件を組合せ、しかも脱窒反応に必要な有機物が脱窒工程で十分に存在する必要があります。

## 5. 窒素除去はなぜ難しいのか

窒素除去の難しさを考えるために、まず窒素除去の必要のない場合の污水处理を考えてみましょう。この場合、有機物さえ除去できれば良いので、豚舎段階では糞ができるだけ汚水に混入ないように分離し、処理施設では十分な曝気を行うことが基本になります（図 6）。処理の良し悪しは処理水の濁り具合を見れば判断できます。

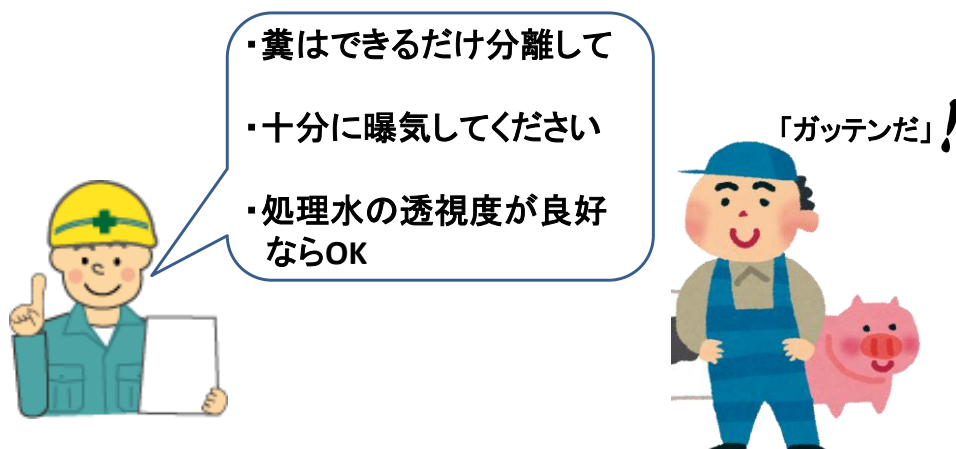


図 6. 硝酸性窒素等の規制導入前の状況

一方、窒素除去を行う場合は、以下の3つのポイントが重要になります。

- ①図7に示したように、窒素除去は糞の混入量に大きく影響を受けます。もちろん、糞が過剰に混入すると処理不能のパンク状態になってしまいますが、分離し過ぎると窒素除去ができなくなるので、適当量の混入が大事です。混入量の目安としては易分解性有機物の指標である生物化学的酸素要求量（BOD）の濃度が窒素（N）濃度の3～5倍とされています。ただし意図的な制御は困難なのが現実です。たまたま適正な混入率になっていて窒素が良く除去されている農家もあれば、適正值からずれているために処理施設をしっかりと管理しているにもかかわらず窒素がかなり残留している農家もあります。

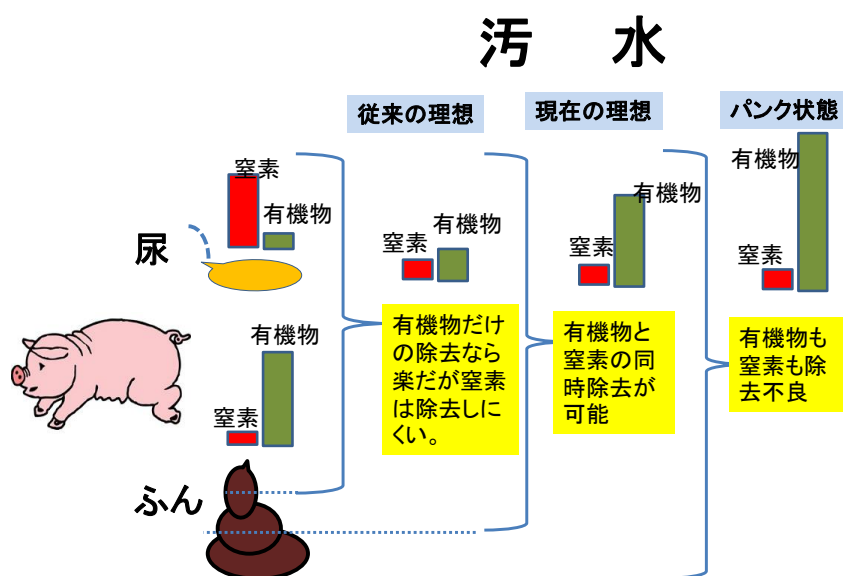


図7. 汚水への糞と尿の混入状況が処理に及ぼす影響

- ②酸素を必要とする硝化反応と、酸素を嫌う脱窒反応とを、うまく共存させる必要があります。
- ③窒素除去がうまく進んでいるかどうかは濁りの程度といった外観では判断できず、アンモニア、亜硝酸、硝酸を測定することが必要です。

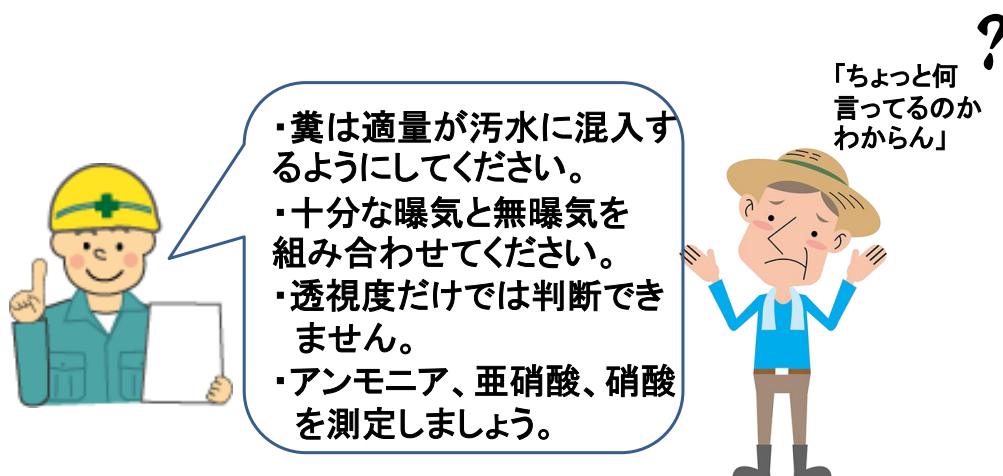


図8. 硝酸性窒素等の規制導入後の状況

以上のように、窒素を除去しようとする調整のポイントが増えて、しかも微妙な調整になり、さらに窒素成分の測定も必要になります。農家にとって（水処理の専門家にとっても）、このような対応を的確に行うのはかなり難しいことになります（図 8）。

## 6. 窒素除去型污水处理施設の構造

窒素除去の原理は以上ですが、実際の污水处理施設では以下の 2 種類の窒素除去法が主に利用されています。

### ① 循環式硝化脱窒法

曝気せずに攪拌だけ行う脱窒槽を前段に置き、曝気を行う後段の硝化槽から硝化液を循環ポンプで脱窒槽に戻して亜硝酸・硝酸を流入汚水中の新鮮な有機物と接触させて脱窒を進めます(図 9)。容積に余裕があり、2 区画に分けられる曝気槽を保有している污水处理施設であれば、改造でこの方式にすることも可能です（図 10）。

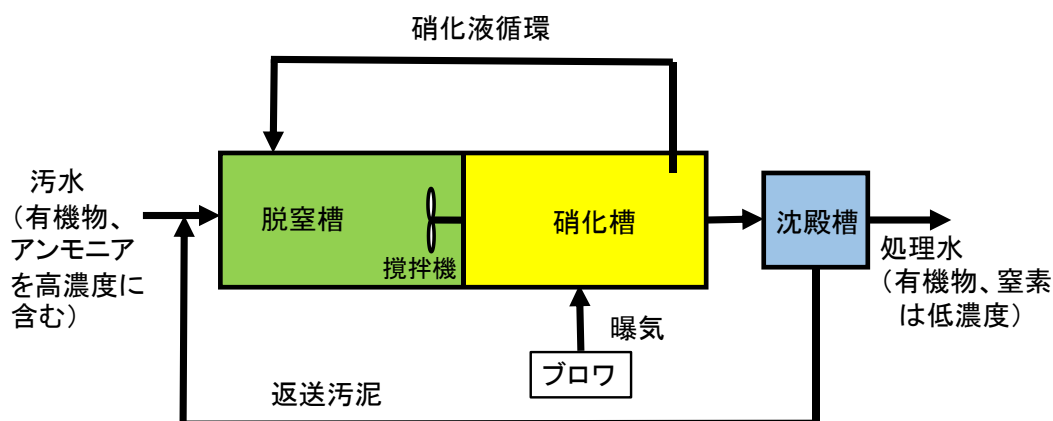


図 9. 循環式硝化脱窒法による窒素除去の原理

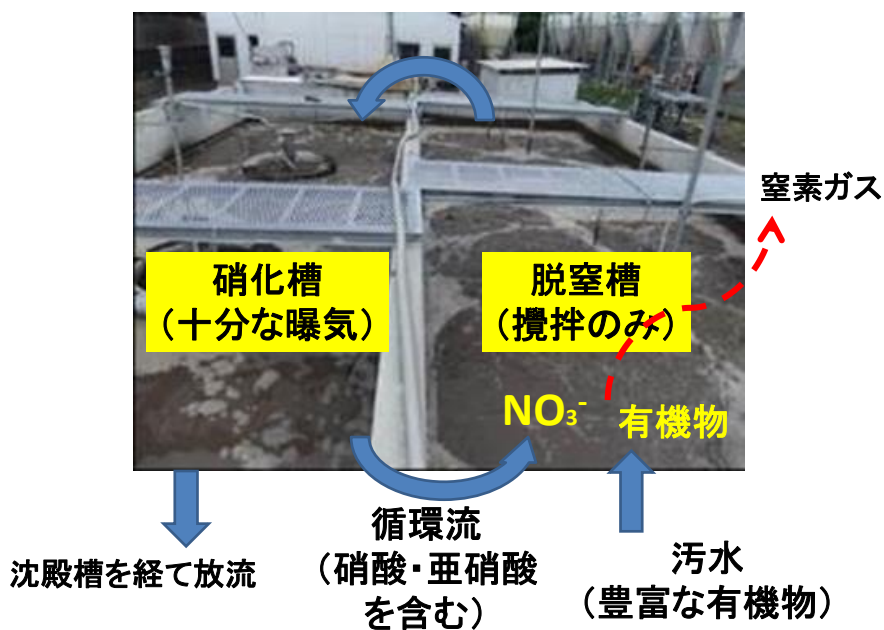


図 10. 循環式硝化脱窒の施設例

## ② 間欠曝気法

曝気槽での曝気を数時間サイクルでオン、オフさせる方式で、曝気時にはアンモニアの硝化が進み、停止時に溶存酸素が低下し脱窒が進みます（図 11）。

循環式硝化脱窒法と同様に、曝気槽の容積に余裕があれば、改造でこの方式にすることもできます（図 12）。ただし、曝気停止時に、散気装置の目詰まりが発生したり、送気配管に液が逆流し曝気再開の支障になったりすることもあるので、改造に当たっては細かい配慮が必要になります。

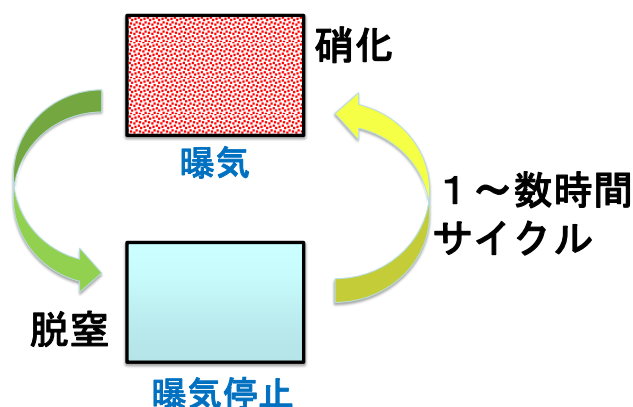


図 11. 間欠曝気法による窒素除去の原理

ブロー  
タイマによ  
り数時間  
サイクルで  
稼働・停止  
を繰り返す



図 12. 間欠曝気の施設例

## 7. 窒素除去の推進策

### 1) 流入污水の水質調整

前述のような窒素対応型污水处理施設を導入しても、污水の水質によっては硝酸性窒素を十分に低減できない場合があります。循環式硝化脱窒法を導入している TU 農場の流入污水について有機物濃度と窒素濃度の比（BOD/N 比）と窒素除去率の関係を見ると、BOD/N 比の低下とともに窒素除去率が減少する傾向が明瞭でした（図 13）。BOD/N 比が 3 以上では窒素除去率は 80～90%ありました



が、2 以下になると 50%程度にまで低下しました。年間を通じて BOD/N 比を 3 以上に維持することが可能であれば硝酸性窒素等の排出濃度は年間を通してかなり改善される可能性があります。

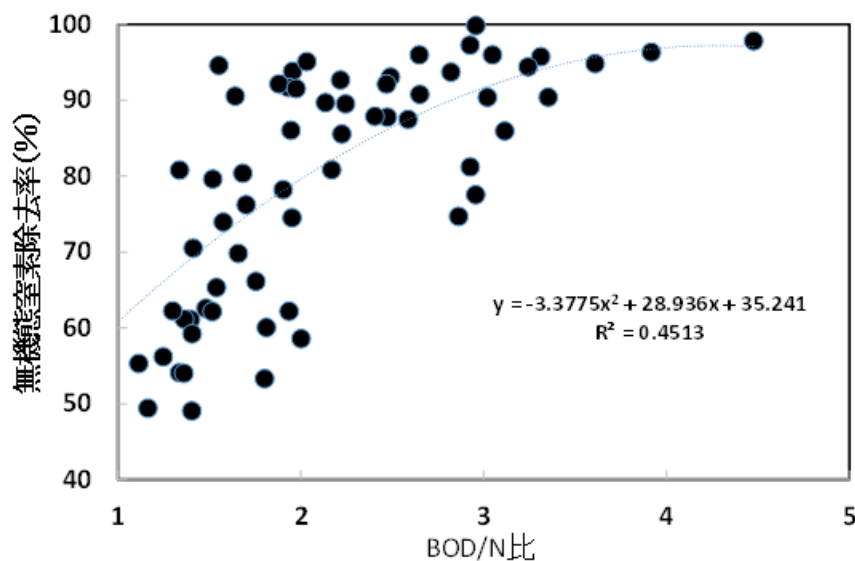


図 13. TU 農場における汚水中 BOD/N 比と処理による窒素除去率の関係

そこで、TU 農場での BOD/N 比の変動メカニズムを探るため、上水混入量の指標となる塩素イオン濃度の変化を把握し BOD/N 比との関係をみたところ、図 14 に示すような負の相関が見られました。この結果より、塩素イオンが低下傾向を示して上水混入量増大が想定される時期には、汚水への糞混入量が増えて BOD/N 比が高まり、結果的に窒素除去に有利と推定されます。塩素イオン濃度は夏季に低下したことから、上水混入量増大は主に夏期における尿量と遊び水量の増加によると推定されます。豚房床面や除糞機に落下した糞に降りかかる尿と遊び水の量が多くなると、汚水に溶け込む糞量が多くなるのだと考えられます。

以上のように、硝酸性窒素等は、汚水の BOD/N 比に左右され、BOD/N 比は尿や遊び水の量に影響を受けることが推測できました。しかし、尿量や遊び水量をコントロールすることは現実的ではありません。何らかの手法によって、糞の混入量を自由に制御する手法が見いだされれば「年間を通して畜産農家の全てが 100mg/l をクリア」という目標の達成に近づくことになります。しかし、このような手法はまだ開発されておらず、今後の検討課題です。



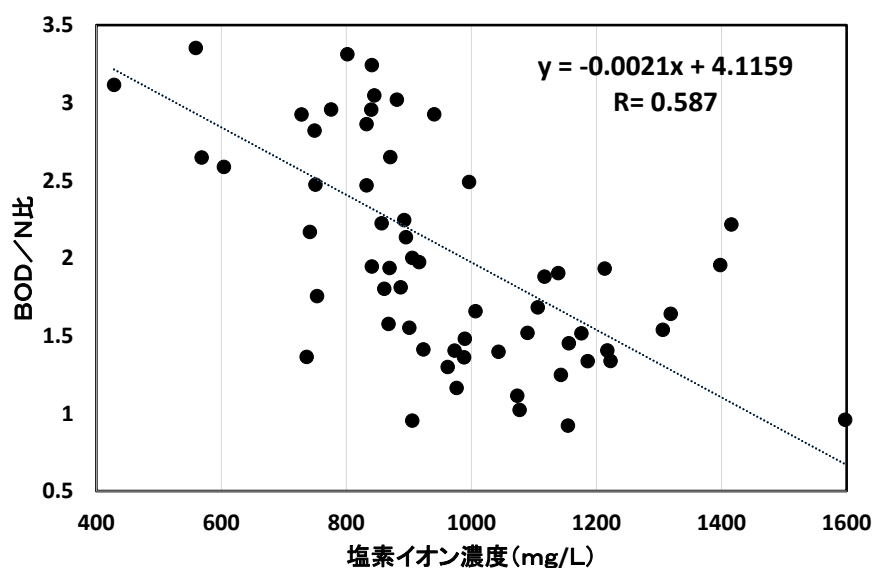


図 14. TU 農場における汚水中 BOD/N 比と塩素イオン濃度の関係

## 2) 水温の保持

水温も窒素除去に大きな影響を与えます。例えば TU 農場の曝気槽水温は、最大約 33℃から最低約 11℃の範囲で変化し、水温が低下する時期には処理水中のアンモニア態窒素の割合が顕著に増加しました。水温低下により硝化反応が阻害され、アンモニアの残留量が増加したと考えられます。冬期でも水温が低下しにくいような工夫が必要です。水中エアレーターのように曝気装置のモーターが曝気槽液中に水没している形式の場合はモーター熱による加温効果で冬季でも比較的高い水温が維持されます。一方、ブロワ方式の場合モーター熱による直接的な加温効果が得られないため、冬期には水温が低下しやすくなります。このような場合に、ブロワのモーター熱を曝気液に伝える工夫をしている事例もあります。

冬期に曝気槽の全面に蓋をして保温性を高めることも有効な対応策になります。ただし、夏期には蓋を外さないと水温が高くなりすぎる場合もあります。

## 3) 膜分離の併用

すでに述べたように、窒素除去のためには、循環式硝化脱窒法か間欠曝気法を導入するのが基本です。これらの方式では、反応槽の汚泥濃度を高めに維持することも硝化性能の向上には重要です。しかし、そうすると沈殿槽で汚泥が浮上したり沈殿槽から流出したりといったトラブルが生じやすくなる場合があります（図 15）。このような場合の対応策として、沈殿槽の替りに膜分離を導入することも選択肢になります。



図 15. 沈殿槽の汚泥蓄積トラブルの事例

新設污水处理施設で膜分離を導入する場合は、曝気槽に膜を水没させてろ過を行う浸漬法（図 16）が一般的で、すでに多くの農家に導入されています。しかし、既設処理施設に浸漬法を導入しようとすると設置工事が困難な場合もあります。このような場合でも容易に導入できる外付け型膜分離法（図 17）が、JRA 畜産振興事業の助成を受けて一般財団法人畜産環境整備機構により開発されています。

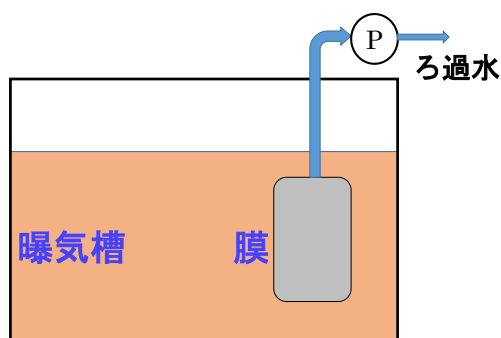


図 16. 浸漬型膜分離法

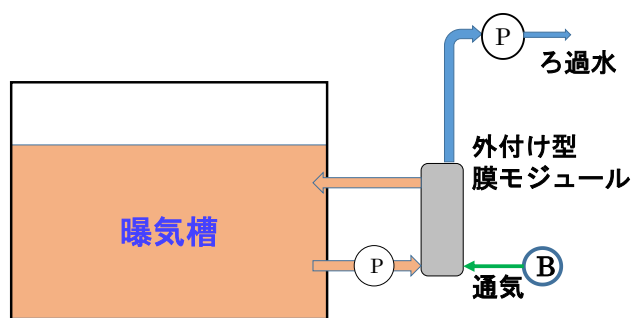


図 17. 外付け型膜分離法

外付け膜分離法では、外径 2mm の細いチューブ状の膜（中空糸膜と呼ばれます）を束ねてプラスチック筒内に挿入した外付け型膜モジュールを使います。このモジュールを曝気槽の外部に所要本数設置し（図 18）、ろ過を行います。膜の素材には調理用フライパンのコーティング材料と同じものが使われています。このため、膜の耐久性が高いのが長所です。



図 18. 外付け型膜モジュールの設置状況

#### 4) 脱窒専用後処理装置の付加

BOD/N 比の過小が原因で硝酸性窒素等を目標値まで低減できない場合は、脱窒専用装置を通常処理施設の後段に付加するのも選択肢です。養豚農家が容易に利用できる脱窒専用装置はまだ確立していませんが、試験検討は各方面で進められています。実用化については未知数ですが、検討中の技術についていくつか紹介します。

##### 【硫黄脱窒法】

この方法では、土壌や水界に広く生息する硫黄酸化脱窒細菌を活用します。この細菌は、無酸素条件下で硫黄を酸化しながら硝酸性窒素を窒素ガスに還元して除去します（図 19）。

利点は、有機物を使用しないことから水質悪化の問題が無く、また処理槽に硫黄含有資材を十分に充填しておけば窒素の変動が生じても特段の調整操作が不要で管理が容易なことです。ただし、活性汚泥処理の段階で十分な硝化を行うことが必要不可欠です。

現在は実証規模での試験が、農研機構畜産研究部門、千葉県畜産総合研究センター、および畜産環境整備機構畜産環境技術研究所の協力で進められています（図 20）。

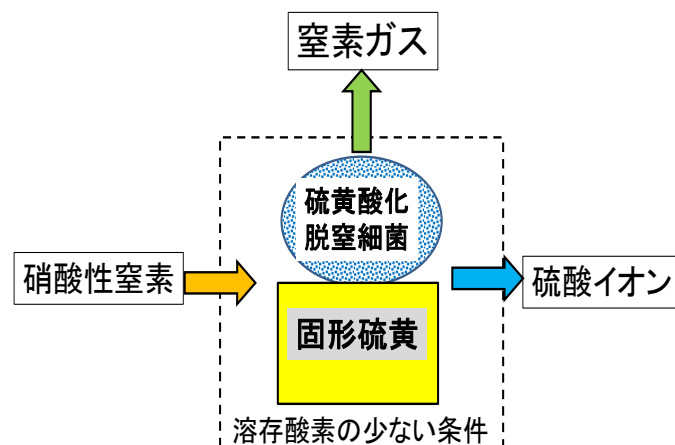


図 19. 硫黄脱窒法の原理



図 20. 上向流式硫黄脱窒の実証試験状況

## ② 紙脱窒法

この脱窒法では、紙の主成分であるセルロースをセルロース分解細菌が加水分解し、生成した可溶性糖類を炭素源として脱窒細菌が硝酸・亜硝酸を還元して窒素ガスにして除去します（図 21）。市販の粉碎古紙や、シュレッター古紙も利用できます。紙は取扱いが容易であることなどから畜産分野での窒素除去に適する可能性があります。

留意点としては、脱窒で発生する窒素ガス気泡が紙層中に蓄積し、その浮力で紙層全体が浮上することと、紙の投入量が多すぎると処理水の有機物濃度（BOD）が高くなってしまいます。これらの特性に対応できる装置構造と維持管理法を確立する必要があります。試験は現在 JRA 畜産振興事業の助成を受けて一般財団法人畜産環境整備機構により進められています（図 22）。

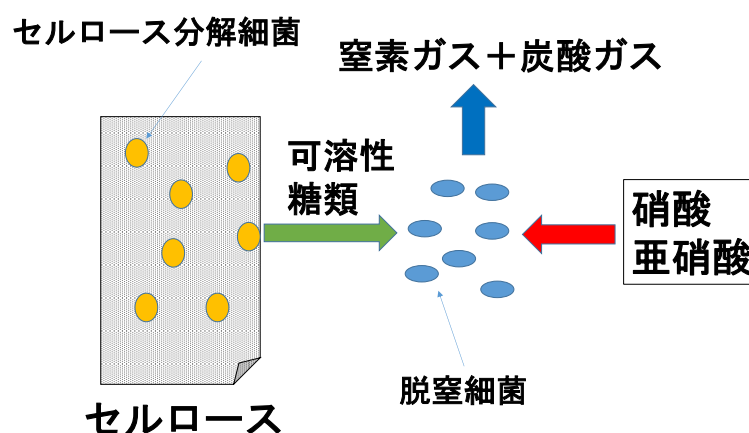


図 21. 紙脱窒法の原理



図 22. 紙脱窒の試験状況

## 8. 硝酸性窒素等以外の汚水処理をめぐる動向

### 1) 水質の自主測定

水質汚濁防止法の規制対象になっている畜産農家は、排出水の水質を年に 1 回以上測定し、その記録を保存しなければなりません。測定項目は、日排水量が 50 m<sup>3</sup> 以上の場合は生活環境項目と有害物質の両方、50 m<sup>3</sup> 未満の場合は有害物質（硝酸性窒素等）のみです。測定を実施していない場合や結果の記録をしていない場合、また記録の保存をしていない場合または虚偽の記載をした場合には罰則が科せられます。また、分析は公定法（環境省の告示で定められた方法）により行う必要があります。

自主測定データは、暫定基準値見直しの際に自治体を通して集約され参考情報として利用される場合もあります。暫定基準値は、「現時点における当該業種の排水濃度の実態及び適用可能な処理技術等に照らして」定められることになっています。従って、全ての農家が法律に則って自主測定を行うことは、業界全体としての排水濃度実態について客観的な情報の提供につながり、暫定基準見直しの検討において大変重要な意味を持つことになります。

なお、法的義務としての測定は最低年 1 回で良いのですが、処理施設の管理の観点からはできるだけこまめに水質を把握することが重要です。この目的での測定は公定法にこだわる必要は無いので、市販の簡易測定用具で各処理段階の濃度を測定することをお勧めします。硝酸性窒素等の濃度は見た目では予測することは不可能です。

### 2) 汚泥の脱水処理用凝集剤に関する規制の変更

昨年までは、脱水用凝集促進材が混入した家畜糞が原料に含まれる堆肥は、普通肥料として農林水産大臣の登録を受けることが必要でした。しかし平成 29 年 11 月に公定規格の改正があり、指定された凝集促進剤であれば混入後も特殊肥料として扱えることになりました。指定凝集促進剤は以下のとおりです。

ポリアクリルアミド系高分子凝集促進材

ポリアクリル酸ナトリウム系高分子凝集促進材

ポリアクリル酸エステル系高分子凝集促進材

ポリメタクリル酸エステル系高分子凝集促進材

ポリアミジン系高分子凝集促進材

アルミニウム系無機凝集促進材

鉄系無機凝集促進材

現場で利用されているものの多くはこれらの指定凝集促進剤に該当しますが、もし非該当の場合は該当品に替える必要があります。

污水处理からは必ず汚泥が発生し、その汚泥の処理が滞ると污水处理も正常に進まなくなります。上記の指定凝集促進剤を適量使用して、しっかりとした脱水機で汚泥を固形化し、堆肥化施設に投入し堆肥化することが污水处理にも、また資源循環の観点からも不可欠です。

## 9. 終わりに

污水处理問題は、対応を怠っている間に状況が深刻化した事例も多く見られます。そうなる前に、まず現状把握から一步を踏み出していいただければと思います。

最後に污水处理施設に関連して重要な事項を以下にまとめましたので参考にしていいただければ幸いです。

### 【規模に見合った施設が大事】

污水处理施設の新設や更新にあたっては、頭数に見合った容積の曝気槽と、発生汚泥量に見合った汚泥脱水機を選定することが最も重要です。能力不足の物を選定してしまうと、後での改善は大変困難です。

### 【曝気槽の活性汚泥濃度に関心を持とう】

どんなにお金をかけた処理施設でも、活性汚泥濃度が過小または過大になると処理は破綻します。時々測定して、高くなったら引き抜いて適正濃度を維持しましょう。

### 【汚泥処理を大事にしよう】

汚泥脱水機は污水处理施設の付録ではなく、縁の下の力持ちといった存在です。汚泥の脱水処理が確実にできるように、凝集剤自動溶解装置と能力の高い脱水機との併用により確実な汚泥処理を行うことが污水处理の安定化にも不可欠です。

### 【水質を知ろう】

処理水についてせめて週に1回は、透視度、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素を測定してください。透視度は透視度計という簡単な器具を使って数分で測定可能です。また窒素化合物の測定は簡易測定用具を購入すれば自前で測定できます。



水質がわかれば、順調に稼働しているのか否か、また順調でない場合には改善策も考えることができます。水質測定による自己診断の大まかな方法は図 23 に記載しました。

水質不明の状態での運転調整は暗闇を手探りで歩くようなものです。また、年に一回は分析会社に委託して水質を測定し、結果を保存してください。これは法的義務です。

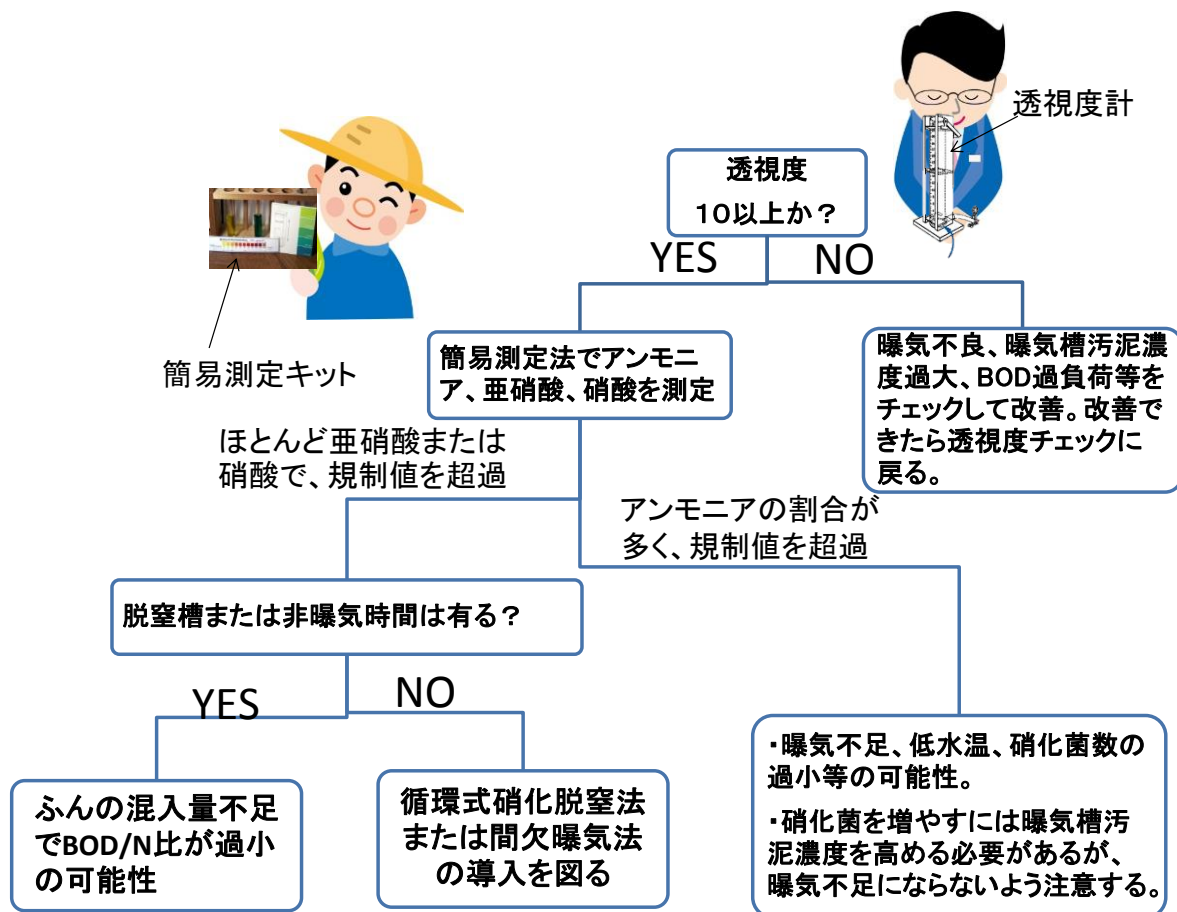


図 23. 水質の自己測定に基づく処理状況の自己診断フロー

### 【飼料の検討も】

窒素排出量が少ない飼料も市販されるようになっていきます。処理の段階で苦労するよりは、排出そのものを減らす方が格段に対応は楽です。この面からも、是非検討していただければと思います。

**最後にお願いしたいことがあります。**3年に1回の暫定基準値の見直しの直前には環境省がパブリックコメントを実施し、予定基準値に対する意見を受け付けることになっています。この機会に、農家がコメントを提出することは、現場の実情を知ってもらう上で重要です。インターネットで提出可能ですので、今後機会がありましたら積極的にコメントされることをお勧めします。コメント内容はいずれ公表されることになります。



## 10. 参考資料

汚水処理に関する一般的な解説は、畜産環境技術研究所のホームページに掲載されている「畜舎汚水浄化処理施設窒素対応管理マニュアル」

[http://www.chikusan-kankyo.jp/osuiss/nkanri\\_manual2/index.htm](http://www.chikusan-kankyo.jp/osuiss/nkanri_manual2/index.htm)

および「畜産汚水の処理技術マニュアルー処理の基本から高度処理までー」

<http://www.chikusan-kankyo.jp/osuikoudo/osuikoudo.html>

に記載されています。

また、外付け型膜分離装置の解説も畜産環境技術研究所のホームページに掲載されています。

<http://www.chikusan-kankyo.jp/sotomaku/sotomaku.html>