

## 農業集落排水処理施設の維持管理基礎講座 (第7回 窒素の除去 (その1))

### 1. はじめに

排水中に含まれる窒素の由来は、食べ物等に含まれるタンパク質と尿の成分である尿素に大きく分けられます。窒素は栄養塩類ともいわれるように、生物にとって重要な元素の1つであり、地球上における物質循環でも主要元素（炭素、リン、硫黄等）の1つです。この窒素の循環（窒素循環）において、細菌類は大きな役割を果たしており、水処理の世界では活動環境（代謝様式）の異なる細菌類を利用した窒素除去が行われています。

今回の講座では、排水中の窒素が微生物によってどのような過程を経て除去されるか、そして農業集落排水処理施設（以下、「集排施設」という。）の特徴を踏まえた留意点についてお話します。

### 2. 窒素の動き

水処理において窒素を除去するということは、液相（流入污水）の窒素を固相（微生物等の汚泥）や気相（大気）に移動させることを意味します。

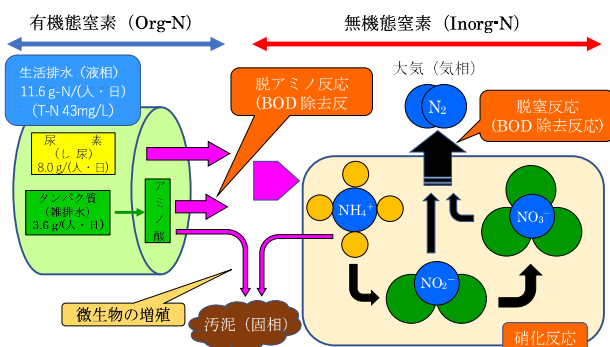


図-1 窒素除去の過程

図-1は、液相の窒素が固相や気相に移動する窒素除去の過程を示したものです。

#### (1) 固相への窒素除去

固相への窒素移動は、有機物等の汚濁物質を処理した結果、微生物が増殖（新細胞合成）する現象のことです。

微生物が新細胞を合成するとき、合成する細胞の組成（細菌類の細胞組成の示性式： $C_5H_7NO_2$ ）に応じて一定割合の窒素を消費します。集排施設では、通常、流入污水中の窒素の1割強（10～15%）が微生物の増殖に使用され汚泥として除去されます。具体的には、流入污水のBOD濃度が200mg/L、窒素濃度が43mg/L（11.6g/（人・日））、汚泥転換率を60%とすると、約6mg/L（1.6g/（人・日））に相当する窒素が微生物の増殖によって汚泥に取り込まれます。つまり、有機物を分解除去し微生物が増殖するだけで、流入污水中の窒素が自動的に除去され、43mg/Lあった窒素濃度が37mg/L前後になるという事です。

ただし、この除去過程には、注意しなければいけないことが1つあります。それは、汚泥が常に水と接触しているということです。例えば、汚泥貯留槽に汚泥を貯留していると、時間の経過とともに微生物は徐々に死んでいくため、細胞を構成していた窒素が水に溶け出してしまいます。条件によって溶出する窒素量に違いはありますが、ひとたび固相（汚泥）から窒素が溶け出すとどうしても液相（分離液）の窒素濃度は高くなってしまいます。汚泥貯留槽の

分離液は脱離液として流量調整槽に戻るため、流量調整槽の窒素濃度が高くなり、結果として除去する窒素量が多くなる現象が発生します。

この現象はリンに関しても同様であり、放流水のリン濃度が急激に高くなる原因の1つになっています。特に、リン規制がある集排施設では、この現象が顕著になると、放流水のリン濃度が規制値を超過し問題になることがあるので注意が必要です。

## (2) 気相への窒素除去

固相（汚泥）に除去されなかった窒素は、気相に移動し除去されるかそのまま液相に残り処理水と一緒に放流されることになります。気相への窒素移動とは、水処理としての窒素除去の過程であり、流入汚水中の窒素は最終的に窒素ガス（ $N_2$ ）として液相から気相に移動します。

その過程は、次の3段階に分けることができます。

- ① 酸素の有無に関係なく有機態窒素（タンパク質、尿素等）が、アンモニア性窒素（ $NH_4^+-N$ ）になる過程
- ② 酸素（ $O_2$ ）が存在する条件下で  $NH_4^+-N$  が、亜硝酸性窒素（ $NO_2^--N$ ）を経由し硝酸性窒素（ $NO_3^--N$ ）になる過程
- ③  $O_2$  が存在しない条件下で  $NO_2^--N$  や  $NO_3^--N$  が、窒素ガス（ $N_2$ ）になり大気（液相）に放出される過程

②の反応のことを硝化反応、③の反応のことを脱窒反応といい、 $N_2$ として放出された窒素は、液相に戻ることはないので③によって窒素は液相から除

去されたことになります。①～③の反応はいずれも微生物が関与しており、特に硝化反応と脱窒反応は、水処理において重要な微生物反応になっています。

## 3. 硝化反応に係わる微生物

流入汚水中の窒素除去で活躍する細菌類のうち、硝化反応に係わる細菌のことを硝化細菌と呼んでいます。

### (1) 硝化細菌と硝化速度

硝化細菌は、 $NH_4^+-N$  を酸化分解し  $NO_2^--N$  を生成する亜硝酸菌と、 $NO_2^--N$  をさらに酸化し  $NO_3^--N$  を生成する硝酸菌の総称であり、無機栄養細菌あるいは化学合成独立栄養細菌とも呼ばれる偏性好気性菌です。（「無機栄養細菌」と「化学合成独立栄養細菌」、「偏性好気性菌」については、次の講座で説明します。）

なお、微生物を扱う分野によっては、亜硝酸菌のことをアンモニア酸化細菌、硝酸菌のことを亜硝酸酸化細菌と呼んでいます。

亜硝酸菌と硝酸菌には数種類の細菌がありますが、淡水で硝化反応に関与する細菌は限られており、集排施設では亜硝酸菌は *Nitrosomonas*、硝酸菌は *Nitrobacter* が通常関与します。したがって、硝化細菌の増殖速度は、日本全国どこでも同じ数値になります。ただし、硝化菌の種類は同じでも、生物反応槽内の硝化菌の生息数や攪拌状態が異なるため、窒素除去の処理能力である硝化速度は処理方式や処理施設毎に異なります。

## (2) 硝化反応

硝化反応は、亜硝酸菌と硝酸菌のリレー反応で進行します。硝化反応がリレー反応であるということは、処理を阻害する要因がなければ、中間物質である  $\text{NO}_2^- \cdot \text{N}$  で硝化反応が止まることはないということです。一般に、硝化反応には、「BOD 濃度、 $\text{NH}_4^+ \cdot \text{N}$  濃度、溶存酸素 (DO) 濃度、pH、水温、滞留時間 (HRT)」等の条件が影響するといわれています。

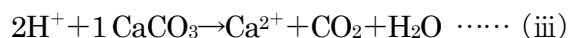
生物反応槽内の BOD や  $\text{NH}_4^+ \cdot \text{N}$  が高かったり (BOD が 100mg/L 以上、 $\text{NH}_4^+ \cdot \text{N}$  が 400mg/L 以上)、DO や pH が低かったり (DO が 0.0mg/L 程度、pH が 5.5 以下) すると、 $\text{NO}_2^- \cdot \text{N}$  で止まったり、そもそも硝化反応が進行しないことがあります。しかし、通常、集排施設ではこのような運転条件になることがないため、硝化反応が問題になることはありません。集排施設において硝化反応が進行しなくなるのは、立ち上げ時に硝化反応が一時的に  $\text{NO}_2^- \cdot \text{N}$  で止まった処理になる場合、ブロワの故障等で硝化菌の生息数が極端に減少した場合、何らかのトラブルで MLSS 濃度が極端に低くなった場合等ですが、いずれも稀な状況といえます。

除去窒素 (N) 当たりに必要な酸素 (O) の数やアルカリ度を意識した化学式で硝化反応を示すと、次式になります。

- ① 亜硝酸菌 :  $1 \text{ NH}_4^+ + 1.5 \text{ O}_2 \rightarrow \text{NO}_2^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+ + \text{エネルギー (66.5kcal)} \dots\dots\dots (\text{i})$
- ② 硝酸菌 :  $1 \text{ NO}_2^- + 0.5 \text{ O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^- + \text{エネルギー}$

$$\text{ギー (17.5kcal)} \dots\dots\dots (\text{ii})$$

〈アルカリ度〉



硝化反応と脱窒反応の各反応について、式中の数字と各原子の分子量から、酸素 ( $\text{O}_2$ ) や有機物 (BOD)、M-アルカリ度の消費量を計算した結果を表-1 に示します。硝化反応では、 $\text{O}_2$  とアルカリ度の消費量が窒素 1 g 当たりそれぞれ 3.43~4.57g- $\text{O}_2/\text{g-NH}_4^+ \cdot \text{N}$  と 7.14 g- $\text{CaCO}_3/\text{g-NO}_x^- \cdot \text{N}$  であり、 $\text{NH}_4^+ \cdot \text{N}$  を硝化するときは多くの  $\text{O}_2$  とアルカリ度が必要であることが分かります。

表-1 生物学的窒素除去の物質収支

| 生物反応  |         | $\text{O}_2$                                                     | BOD                                                    | アルカリ度                                                               |
|-------|---------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
|       |         | 消費量<br>(g- $\text{O}_2$ /<br>g- $\text{NH}_4^+ \cdot \text{N}$ ) | 消費量<br>(g-BOD /<br>g- $\text{NO}_x^- \cdot \text{N}$ ) | 消費量<br>(g- $\text{CaCO}_3$ /<br>g- $\text{NO}_x^- \cdot \text{N}$ ) |
| 硝化反応  | ①亜硝酸菌   | 3.43                                                             | —                                                      | 7.14                                                                |
|       | ②硝酸菌    | 1.14                                                             | —                                                      | —                                                                   |
|       | ①+②     | 4.57                                                             | —                                                      | 7.14                                                                |
| 脱窒反応  | ③-1 亜硝酸 | —                                                                | 1.71                                                   | -3.57<br>(増加)                                                       |
|       | ③-2 硝酸  | —                                                                | 2.86                                                   | -3.57<br>(増加)                                                       |
| 硝化反応  |         | 3.43~                                                            | 1.71~                                                  |                                                                     |
| +脱窒反応 |         | 4.57                                                             | 2.86                                                   | 3.57                                                                |

## 4. 脱窒反応に係わる微生物

流入汚水中の窒素除去で活躍する細菌類のうち、脱窒反応に係わる細菌のことを脱窒菌と呼んでいます。

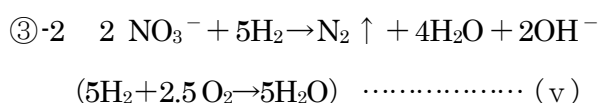
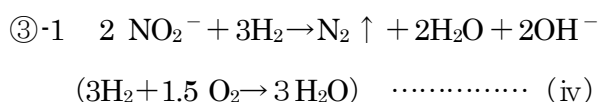
(1) 脱窒菌とは

脱窒菌は通性嫌気性菌であり、BOD を除去する細菌（BOD 除去細菌（従属栄養細菌））のうち、無酸素状態でも増殖できる細菌類のことであり、硝酸性窒素を還元（酸素を取り除く）し窒素ガス（N<sub>2</sub>）を生成します。代表的な脱窒菌としては、*Pseudomonas*や*Alcaligenes*、*Hyphomicrobium*等が知られています。（「通性嫌気性細菌」と「従属栄養細菌」については、次回の講座で説明します。）

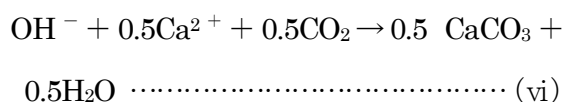
## （２）脱窒反応

脱窒反応は、脱窒菌にしてみればNO<sub>2</sub><sup>-</sup>-NやNO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Nの酸素（結合酸素）を使って有機物を分解（硝酸呼吸）することですが、人間にとってはNO<sub>2</sub><sup>-</sup>-NやNO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Nから酸素を取り除き流入汚水中の窒素をN<sub>2</sub>として大気中に放出する反応のことであり、無酸素条件下でBODを除去する反応です。

除去窒素（N）当たりに必要なBOD（H）の数やアルカリ度を意識した化学式で脱窒反応を示すと、次式になります。



〈アルカリ度〉



表－１より、脱窒反応では、窒素1g当たり1.71～2.86g-BOD/g-NO<sub>x</sub><sup>+</sup>-NのBODを除去し、3.57g-CaCO<sub>3</sub>/g-NO<sub>x</sub><sup>-</sup>-Nのアルカリ度が増加（回復）し

ます。このことは、とても重要な意味を持っており、次章で説明します。

## 5. 集排施設における窒素除去

### （１）集排施設における窒素除去の特徴

窒素除去では、硝化反応だけで終わらずに脱窒反応まで行うほうが、処理水質が良く処理も安定し経済的になります。その理由は、表－１の“硝化反応＋脱窒反応”の収支結果から説明できます。O<sub>2</sub>とBODはブロワの稼働時間に、アルカリ度はpHの緩衝能力に関係があります。

硝化反応では、O<sub>2</sub>（4.57g-O<sub>2</sub>/g-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N）とアルカリ度（7.14g-CaCO<sub>3</sub>/g-NO<sub>x</sub><sup>-</sup>-N）を消費します。これでは、ブロワの稼働時間が長くなり緩衝能力も小さくなるため、電力消費量が多くなりpHも低下しやすい不安定な処理になります。一方、脱窒反応では、BODを消費するのでブロワの稼働時間が短くなり、さらにアルカリ度が増加し緩衝能力が回復するためpHが低下しにくくなり処理の安定性が確保されます。つまり、脱窒反応は、硝化反応で消費したO<sub>2</sub>やアルカリ度をリカバリーする反応であり、「硝化を行ったのなら、脱窒を行わないと損をする」という言葉には、重要な意味があります。

ところで、集排施設にとって硝化反応と脱窒反応のどちらが苦手かご存じでしょうか。どちらの反応も得意なら苦労しないのですが、実は脱窒反応を苦手としています。苦手とする主な理由は、以下のとおりです。

- ・BOD-SS 負荷が低い
- ・連続流入で間欠ばつ気方式の窒素除去

間欠ばつ気方式が苦手な理由になるのは、ばつ気工程終了時の DO 濃度が高い（2 mg/L 以上）場合です。ばつ気工程終了時に DO が高い状態だと、DO が 0.0mg/L 程度まで下がるのに時間を要し脱窒反応がなかなか進行しません。また、JARUS 型ではほとんどの処理方式が、ばつ気工程でも生物反応槽に汚水を投入する連続流入方式のため、脱窒工程時の BOD 除去を効果的に活用できない場合があります。

一方、硝化反応は得意としており、特に意識しなくても反応が勝手に進行する程です。硝化反応を得意とする主な理由は、以下のとおりです。この2点は、いずれも硝化菌の増殖に有利な条件になります。

- ・汚泥滞留時間（SRT）が長い
- ・BOD-SS 負荷が低い

## （2）標準活性汚泥法と JARUS 型の違い

同じ活性汚泥方式である標準活性汚泥法と JARUS-XIV型について、運転条件の違いを表－2 に示します。

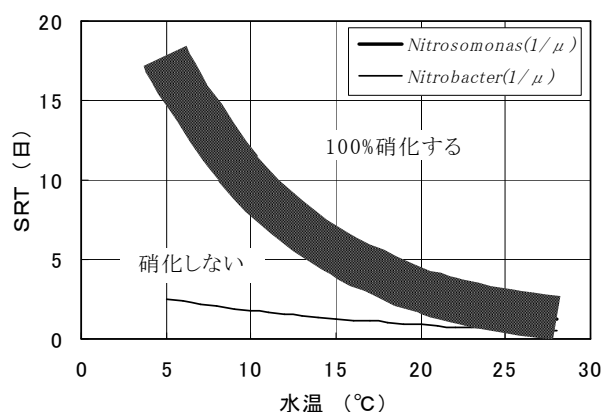
脱窒反応を苦手とする JARUS-XIV型は、標準活性汚泥法と比較し BOD-SS 負荷が 1/5～1/10 程度低くなっています。

一方、標準活性汚泥法は、SRT（ASRT）が集排施設の 10～20 日と比較し 3～6 日と短くなっています。硝化細菌は水温の影響を大きく受ける細菌であり、特に低水温時には硝化菌を保持するため SRT

の日数が重要になってきます。硝化反応に必要な SRT と水温の関係を図－2 に示します。図から水温 15℃において、亜硝酸菌（*Nitrosomonas*）を生物反応槽に保持し安定した硝化反応を維持するためには、SRT が 5.6 日以上必要であることが分かります。このことから、ASRT が 6 日以下の標準活性汚泥法は、硝化反応に必要な硝化菌の保持を不得手としており、硝化反応を苦手に行っているといえます。

表－2 主な運転条件の比較

|                                  | 標準活性汚泥法     | JARUS-XIV型  |
|----------------------------------|-------------|-------------|
| BOD-SS 負荷<br>(kg-BOD/ (kg-SS・日)) | 0.2～0.4     | 0.044～0.089 |
| MLSS<br>(mg/L)                   | 1,500～2,000 | 2,000～4,000 |
| ASRT<br>(日)                      | 3～6         | 10～20       |
| 汚泥返送比<br>(%)                     | 20～30       | 100～200     |
| HRT<br>(時間)                      | 6～8         | 27          |



図－2 硝化反応に必要な SRT

なお、表－２中の HRT (Hydraulic Retention Time) は水理学的滞留時間で、流入汚水が水槽(生物反応槽等)に滞留する平均的な時間を表します。計算式は、以下のとおりです。

$$\text{HRT (時間)} = 24 \times V / Q$$

ただし、V：水槽の容量 (m<sup>3</sup>)

Q：流入汚水の流量 (m<sup>3</sup>/日)

また、ASRT (Aerobic Sludge Retention Time) は好氣的汚泥滞留時間といい、生物反応槽の好氣的条件(ばっ気工程)における汚泥滞留時間を表しています。ASRT は、生物反応内の硝化細菌の保持量に関する重要な運転制御因子であり、SRT と以下の関係があります。

$$\text{ASRT (日)} = \text{SRT} \times \text{AT} / 24$$

ただし、SRT：汚泥滞留時間 (日)

AT：ばっ気時間 (時間/日)

SRT (Sludge Retention Time) の計算式を参考までに以下に示します。

$$\text{SRT (日)} = V \times X / \Delta \text{SS}$$

ただし、V：生物反応槽の容量 (m<sup>3</sup>)

X：MLSS (mg/L)

ΔSS：生物反応槽内生成 SS 量 (g/日)

式中の ΔSS は 1 日当たりの除去 BOD 量と汚泥転換率から計算した生物反応槽内で増殖する微生物量ですが、1 日当たりの余剰汚泥引抜量と処理水中の SS 量の合計でも構いません。

### (3) 集排施設における窒素除去の留意点

窒素除去タイプの集排施設では、脱窒反応に影響する要因である、①硝化反応の進行状態、②DO 濃度、③MLSS 濃度、等を把握し、脱窒反応を促進する運転操作を実践することが求められます。

集排施設の窒素除去方法は、一部(膜分離活性汚泥方式等)を除き同一槽でばっ気工程と非ばっ気工程(あるいは、攪拌工程)を繰り返す間欠ばっ気方式です。間欠ばっ気方式では、ばっ気工程で硝化反応が十分進行したら、DO が上昇しないうちにブロワを停止し、非ばっ気工程に移行させます。DO を低く抑えることができたなら、非ばっ気工程で脱窒反応はより早く進行し、結果として脱窒反応に十分な時間を確保することができます。

ばっ気工程の設定方法は様々ですが、以下に例を示します。

- ① 1 サイクル(ばっ気工程+非ばっ気工程)は 60 分を基本にし、BOD-SS 負荷が低い場合は、90 分あるいは 120 分に調整します。
- ② 生物反応槽の DO が十分低い(0.5mg/L 以下)ことを確認し、ブロワを稼働させ DO が上昇し始める時間を測定します。DO の目安は 0.5 ～2.0mg/L 程度です。
- ③ ブロワを稼働させ DO が上昇し始めた時間までをばっ気工程とし、残りを非ばっ気工程とします。
- ④ 非ばっ気工程で DO が 0.5mg/L 以下になる迄の時間を測定し、時間がかかるようならばばっ気時間を短くします(条件によっては、

MLSS 濃度を高くする方法もあります。)。時間の目安は 10～15 分以内です。

- ⑤ ②～④を維持管理時に確認し、ばっ気工程の調整を行います。

なお、回分方式の場合は、最終ばっ気工程の終了時の DO 濃度が十分低い状態 (0.5～2.0mg/L 程度が目安) になるようばっ気時間を調整します。また、インバーターが設置されている施設では、インバーターを使用しない状態で DO を測定して下さい。

単位時間当たりの酸素供給量を増やすことができれば、1 サイクル当たりのばっ気時間を短く (ばっ気ブロワの運転時間を短縮) することができ、消費電力量の削減になります。逃がし弁でばっ気風量を逃がしたりインバーターで風量を絞るとばっ気工程が長くなり、その分脱窒反応の時間が短くなります。インバーターは、明らかにばっ気風量が多い (ばっ気強度が強すぎる) ときやばっ気時間の調整だけでは DO 濃度を制御できないときにばっ気風量を微調整するために使用して下さい。

硝化反応や脱窒反応が十分進行しているか、ばっ気工程の時間設定が適切か現場で確認するには、簡易水質分析法を使用する方法 (主に、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  を対象にします。) があります。また、ポータブルセンサーで DO や ORP (酸化還元電位) を測定し、経時変化 (トレンド) を観察する方法も実用的な方法です。硝化反応や脱窒反応等の生物反応における DO と ORP の正常な測定値を表-3 に示します。表-3 から、DO 計だけでなく ORP 計を併用すると、

生物反応槽内の処理状況をより正確に把握できることが分かります。

表-3 生物反応における DO、ORP の関係

| 生物反応         | DO (mg/L)    | ORP (mV)      |
|--------------|--------------|---------------|
| 硝化<br>BOD 除去 | >0           | +             |
| 脱窒<br>腐敗     | 0<br>(無酸素状態) | -<br>(-200～0) |

今回は、窒素除去に関わる微生物 (細菌類) と、窒素除去タイプではありませんが JARUS- I 型や JARSU-S 型の pH 低下についてお話しします。