

連続流入間欠ばっ気活性汚泥方式の農業集落排水施設の窒素除去性能とその支配要因

中野拓治 安元 純

琉球大学農学部, 〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原 1 番地

要 旨

連続流入間欠ばっ気活性汚泥方式の農業集落排水施設の窒素除去性能とその支配因子について、供用中の施設から得られた観測データを用いて考察した。窒素除去性能には、硝化・脱窒工程でのばっ気槽内の酸化還元電位が大きく関与しており、安定した除去性能を確保するためには、攪拌工程においては攪拌時間、ばっ気攪拌工程ではばっ気時間・ばっ気強度の適切な設定を通じて、ばっ気攪拌終了時は酸化状態に、また、攪拌終了時には確実に還元状態となるような運転・管理条件を保つことが重要であることが確認された。また、ばっ気槽内がばっ気攪拌終了時に好気状態 (ORP 値で 100mV 程度)、攪拌終了時に嫌気状態 (ORP 値で -50~-200mV の範囲) が確保されている条件では、窒素除去は完全混合流による 1 次反応に従っていると同時に、窒素除去率は、ばっ気槽内の MLSS、水温、ばっ気攪拌終了時 DO 濃度、水理学的滞留時間を説明変数とする双曲線関数式から推定できることが示唆された。

キーワード：農業集落排水施設、連続流入間欠ばっ気活性汚泥方式、窒素除去、支配因子、硝化・脱窒工程、運転管理

1. はじめに

農業集落排水施設には、活性汚泥法の一つである連続流入間欠ばっ気方式が広く採用されている (中野, 2001)。しかしながら、実際に稼働している施設のデータ等による調査研究が少ないことから、当該方式の農業集落排水施設における窒素除去性能に係る定量的な評価と浄化特性について、解明が十分になされていないのが現状である。また、その一方で農業集落排水施設についても、閉鎖性水域での富栄養化防止対策や上乘せ規制の強化等から、高度な水質をより経済的に確保することが求められている (谷山, 2000)。

さらに、2003年度までに4,243地区の農業集落排水施設が供用を開始しており、施設の新規整備と併せて、既存施設の適切な維持管理や更新期を迎えた施設の円滑な改築が重要な課題となっている。

本報では、このような背景を踏まえ、農業集落排水施設における設計・管理諸元の適切な設定に寄与するため、(社)日本農業集落排水協会 (現・(社)地域環境資源センター) の調査データを用いて、連続流入間欠ばっ気活性汚泥方式施設の窒素除去性能とその支配因子について、考察した。

2. 調査施設

調査は、連続流入間欠ばっ気方式の日本農業集落排水協会 XIV 型システムを採用している供用率 70%以上の 3 施設を対象に実施した (Table 1)。調査施設の処理フローと運転管理諸元・状況は、それぞれ Fig.1 と Table 2 に示すとおりであり、ばっ気槽ではばっ気攪拌工程と攪拌工程を 1 サイクルの処理工程として運転管理を行っている (日本農業集落排水協会, 1998a; 日本農業集落排水協会, 1998b)。

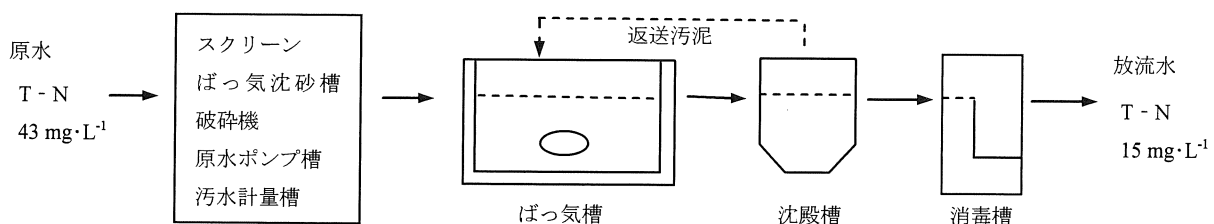


Fig.1 連続流入間欠ばっ気方式の調査施設 (日本農業集落排水協会 XIV 型システム) における処理フロー
Flow diagram of observed rural sewerage facilities with intermittent aerobic suspended-growth processes (XIV type)

3. 調査内容

調査は、Table 1 に示す期間を対象に原則として年間12回(月毎)の頻度で実施した。調査では、ばっ気槽流入水と沈殿槽流出水について、JIS K 0102 工場排水試験法に基づき、BOD、T-N、NH₄-N、NO₂-N、NO₃-Nを測定した(Table 3)。また、ばっ気槽内のMLSS、pH、水温、ばっ気攪拌工程終了時DO、ばっ気攪拌工程終了時ORP、攪拌工程終了時ORPを測定するとともに、ばっ気強度、ばっ気攪拌時間、攪拌時間についても調査した。さらに、有機性窒素に関しては、測定されたT-N濃度から無機三態窒素(NH₄-N、NO₂-N、NO₃-N)の測定濃度を差し引いて求めた。なお、サンプリングは、1日を3または4区分し、30分毎に採水した試料を流量比で混合し、その時間区間のコンポジット試料とする方法に従うとともに、コンポジット試料から得られた水質調査結果を平均することにより、1日1データとして整理した。

Table 1 調査施設と調査期間

Observed rural sewerage facilities and observation period			
施設名	設置場所	供用人口(人)	調査期間
T	富山県魚津市	276	'95.4.18~'96.3.27
K	滋賀県西浅井町	145	'92.5.21~'93.4.16
Y	滋賀県高島町	431	'93.6.15~'94.5.24

Table 2 調査施設の運転管理諸元と運転管理状況
Standard management criteria and operation conditions in observed rural sewerage facilities

項目	管理諸元	運転管理状況*
T-N除去率(%)	65以上	85.2(48.7~97.0)
ばっ気・攪拌サイクル数(d ⁻¹)	24	14(10~20)
ばっ気攪拌時間(min)	30	35(16~60)
攪拌時間(min)	30	71(35~105)
ばっ気強度(m ³ ・m ⁻³ ・h ⁻¹)	2.0	1.8(0.95~2.4)
MLSS(mg・L ⁻¹)	3,000	3,415(803~6,178)
水理学的滞留時間(h)	27	23.3(4.5~47.6)

注) *の運転管理状況欄の数値は、平均値。また、括弧内の数値は、最大値と最小値を示しており、範囲を表示

Table 3 調査内容

Contents of investigation	
調査項目	調査位置
BOD、T-N、NH ₄ -N、NO ₂ -N、NO ₃ -N、(有機性窒素)*	ばっ気槽流入部、沈殿槽流出部
流入水量	汚水計量槽
MLSS、pH、水温、ばっ気攪拌工程終了時DO、ばっ気攪拌工程終了時・攪拌工程終了時ORP、ばっ気強度、ばっ気攪拌時間、攪拌時間	ばっ気槽

注) *の括弧内の有機性窒素は、T-Nの測定値からNH₄-N、NO₂-N、NO₃-Nの測定値を差し引いて算定

4. 調査結果と考察

4.1 窒素除去性能の特性と評価

ばっ気槽流入水の平均T-N濃度は、設計流入濃度の9割程度(37.4mg・L⁻¹)である一方、流入水量の平均値は設計水量に比べて1割程度高い値(339.9L・人⁻¹・d⁻¹)を示している(Table 4)。この実測データから算定されたT-N負荷は、設計値と同程度(12.7g・人⁻¹・d⁻¹)となっており、窒素除去性能の評価に今回の調査データを流入負荷条件として用いて検討しても差し支えないものと考えられる。

そこで、ばっ気槽流入水と沈殿槽流出水のT-N濃度は、Table 5の全データ欄に示すように広い範囲に分布しているため、平均値で除して無次元化濃度の範囲と標準偏差を求めたところ、沈殿槽流出水の値はばっ気槽流入水に比較して大きい値を示しており、沈殿槽流出水のT-N濃度はばっ気槽流入水の濃度分布に比較してバラツキが大きい。また、ばっ気槽流入水と沈殿槽流出水のT-N濃度の実測値について、代表的な確率分布である正規確率と対数正規確率を用いて濃度分布のあてはめを行ったところ、Fig.2に示すようにいずれも対数正規確率から求められた回帰直線の決定係数が高い値となっており、濃度分布は対数正規分布によく一致している。このため、ばっ気槽流入水と沈殿槽流出水のT-N濃度は、対数正規分布に従っているものと仮定し、尿尿浄化槽等の性能評価に用いられる非超過確率75%値に相当するT-N濃度を算出したところ、それぞれ41.8mg・L⁻¹、7.2mg・L⁻¹の値(窒素除去率:82.8%)が得られた。

窒素除去性能の特性を把握するため、ばっ気槽流入水と沈殿槽流出水のT-N濃度に占める有機性窒素、NH₄-N、

Table 4 流入負荷条件

Influent T-N load condition in aeration tank			
項目	測定値*	設計値	
T-N濃度(mg・L ⁻¹)	37.4	43.0	
流入水量(L・人 ⁻¹ ・d ⁻¹)	339.9	300.0	
流入T-N負荷量(g・人 ⁻¹ ・d ⁻¹)	12.7	13.0	

注) *の測定値は、実測された全データ(データ数:33)の平均値

Table 5 ばっ気槽流入水と沈殿槽流出水のT-N濃度の分布状況
Distribution of influent T-N concentration in aeration tank and effluent T-N concentration in sedimentation tank

項目	ばっ気槽	
	流入水	沈殿槽流出水
T-N濃度(mg・L ⁻¹)	24.2~51.9	1.0~16.3
全データ	無次元化T-N濃度	0.65~1.39
	標準偏差	0.182
0.91		
ORP値で整理したデータ*	T-N濃度(mg・L ⁻¹)	24.2~48.3
	無次元化T-N濃度	0.67~1.33
	標準偏差	0.204
		0.243

注) *のORP値で整理したデータ欄は、全データのうち、ばっ気攪拌終了時のORPが正の値であるとともに、攪拌終了時のORPが-50mVより低い値を示す観測データのみを集計・整理

NO_x-N (NO₂-NとNO₃-Nを合わせたもの)を整理した。ばっ気槽流入水の全窒素濃度に占める有機性窒素, NH₄-N, NO_x-Nの比率は, それぞれ49.6%, 49.9%, 0.5%となっており, ばっ気槽流入水はケルダール窒素 (有機性窒素とNH₄-Nの総和) によって占められ, 硝酸性窒素をほとんど含んでいない (Fig.3)。一方, 沈殿槽流出水の全窒素濃度に占める有機性窒素, NH₄-N, NO_x-Nの比率は, それぞれ23.0%,

28.0%, 49.0%の値を示しており, 流入水中の有機性窒素の無機化やNH₄-Nの硝化作用とともに, 処理過程で生成されたNO_x-Nの脱窒作用によって, 窒素除去が図られているものと考えられる。また, 沈殿槽流出水にはNO_x-Nが5割程度含まれていることから, 処理過程で生じたNO_x-Nの低減をさらに促進することにより, 硝化・脱窒プロセスの効率化を図れる可能性があることが確認された。

このため, ばっ気槽終了時と攪拌終了時のORPを50mV毎に区分して, 沈殿槽流出水に含まれるNH₄-NとNO_x-Nの値を求めたところ, ばっ気槽終了時のORPが正の値を示す範囲では沈殿槽流出水のNH₄-Nは, 2mg・L⁻¹以下の値で推移するとともに, ORP値が負の場合には9.1mg・L⁻¹と急増している (Fig.4)。一方, 沈殿槽流出水中のNO_x-Nは, 攪拌終了時のORP値の増加に対応して増えており, ORPが-50mVから正の範囲においては2.0~6.2mg・L⁻¹と高い値を示している。これらのことから, ばっ気槽終了時にばっ気槽内が還元状態にある場合には硝化作用が十分に進まず, 沈殿槽流出水のNH₄-Nが高い値を示す一方, 攪拌終了時にばっ気槽内が酸化状態若しくは弱い還元状態である場合には十分な脱窒作用が起こらず, 処理過程で生成されたNO_x-Nが沈殿槽流出水中に残存する結果になったものと考えられる。

そこで, ばっ気槽流入水と沈殿槽流出水のT-N濃度について, 全データのうち, ばっ気槽終了時のORPが正の領域で攪拌終了時のORPが-50mVより低い値を示す観測データを対象に, 濃度範囲と標準偏差を求めたところ, 全データを対象にしたT-N濃度の濃度分布に比較してバラツキが小さくなっているとともに, ばっ気槽流入水と沈殿槽流出水の非超過確率75%値に相当するT-N濃度として, それぞれ41.1mg・L⁻¹, 1.7mg・L⁻¹ (窒素除去率: 95.9%)の値が得られた。ばっ気槽終了時のORPが正の範囲で攪拌終了時のORPが-50mVより低い値を示す観測データを対象に評価したT-N除去率は, 全データを対象に評価したT-N除去率に比較して約13%高い窒素除去性能を発揮しているといえる。窒素除去性能には, 硝化・脱窒工程におけるばっ気槽内のORPが大きく関与しており, 安定した窒素除去性能を確保するためには, ばっ気槽終了時は酸化状

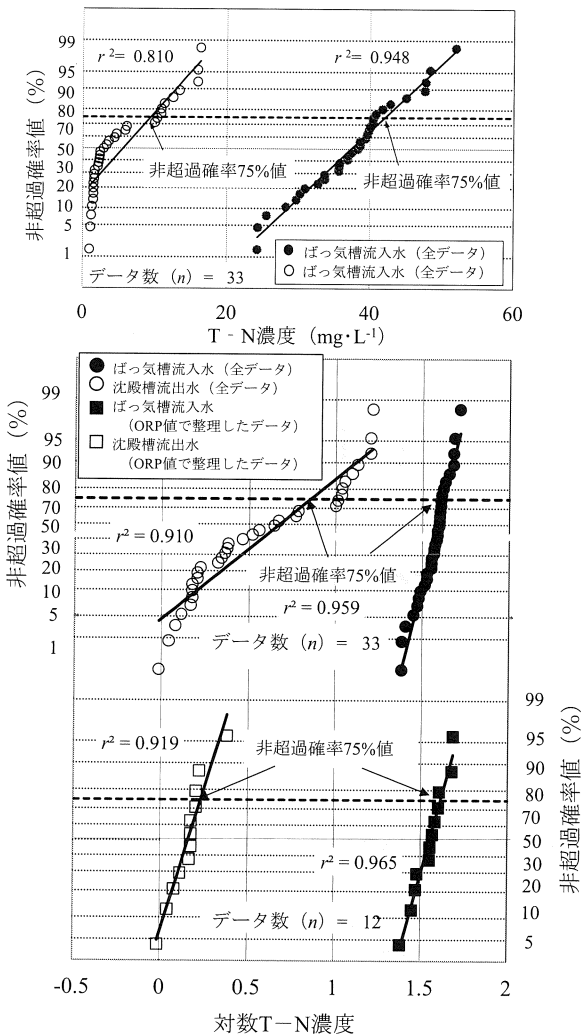


Fig.2 ばっ気槽流入水と沈殿槽流出水の T - N 濃度の確率分布
Evaluation of probability distribution of influent T - N concentration in aeration tank and effluent T - N concentration in sedimentation tank

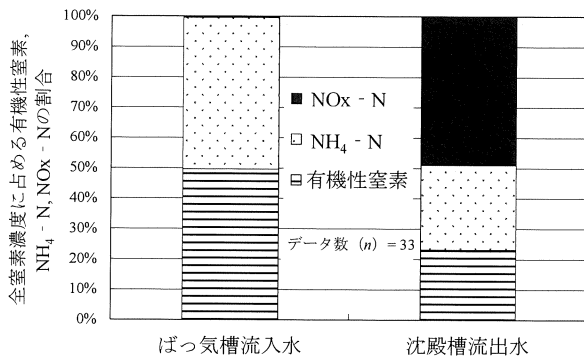


Fig.3 ばっ気槽流入水と沈殿槽流出水における T - N の内訳
T - N profile in influent of aeration tank and effluent of sedimentation tank

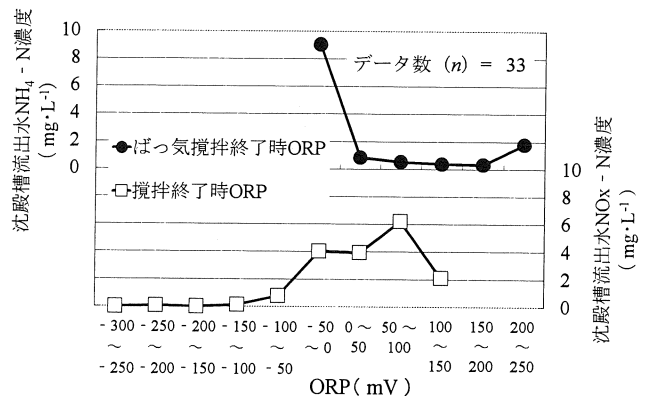


Fig.4 ばっ気槽の ORP と沈殿槽流出水 NH₄-N・NO_x-N の関係
Relation between ORP in aeration tank and effluent NH₄-N or NO_x-N concentration in sedimentation tank

態に、また、攪拌終了時には着実に還元状態となるような運転・管理条件を設定することが重要であると考えられる。

4.2 ばっ気槽の ORP 管理と運転管理

窒素除去性能には、硝化・脱窒工程におけるばっ気槽内の ORP が大きく関与していることが 4.1 で確認されたことから、ばっ気槽内の ORP 管理を通じた運転管理への反映について、検討した。ばっ気攪拌終了時と攪拌終了時の ORP の間には正の相関(相関係数: 0.766)が存在しており、ばっ気攪拌終了時の ORP の増加に対応して攪拌終了時の ORP も高い値を示している (Fig.5)。ばっ気攪拌終了時に ORP が正の値を示すのは、攪拌終了時の ORP の値が概ね -200mV を下回ることがない領域 (-50~-200mV) になっているとともに、攪拌終了時の ORP が -50mV より低い値を示すのは、ばっ気攪拌終了時に ORP が概ね 100mV を上回ることがない領域 (0~100mV) であるといえる。

そこで、ばっ気槽における 1 サイクル当たりの攪拌時間と攪拌終了時の ORP の関係を検証したところ、両者の間には負の相関(相関係数: -0.890)が存在しており、攪拌終了時の ORP が -50~-200mV の範囲を示すのは、1 サイクル当たりの攪拌時間が概ね 70~90 分の範囲となっている (Fig.6)。また、ばっ気槽における 1 サイクル当たりのばっ気量とばっ気攪拌終了時の ORP の関係を検討したところ、ばっ気攪拌終了時の ORP 値を 100mV の近傍範囲に維持す

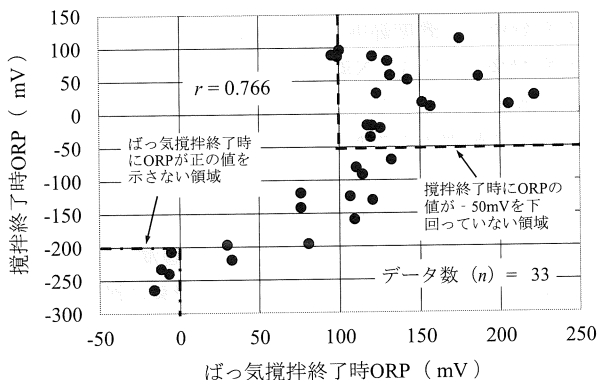


Fig.5 ばっ気攪拌終了時 ORP と攪拌終了時 ORP の関係
Relation between ORP at aeration time and ORP at stir time in aeration tank

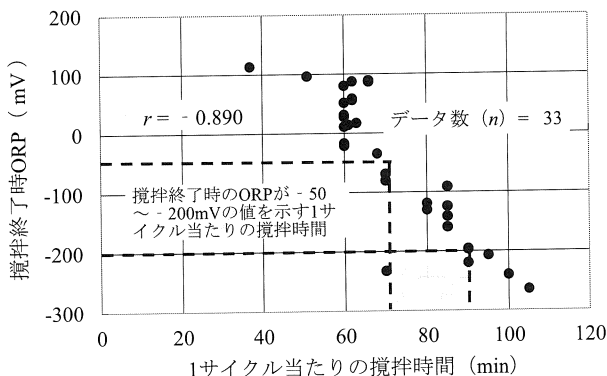


Fig.6 1 サイクル当たりの攪拌時間と攪拌終了時 ORP の関係
Relation between ORP and stir time in aeration tank

るためには、Fig.7 に図示したように 1 サイクル当たりのばっ気量が $1\text{m}^3 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{回}^{-1}$ 程度となるような運転条件を設定することが必要であることが確認された。

このように、攪拌工程においては 1 サイクル当たり 70~90 分程度の攪拌時間を確保することにより、ばっ気槽内が極度の還元状態になることを防止し、適度な還元状態(攪拌終了時の ORP が -50~-200mV の範囲)を維持できるといえる。また、ばっ気攪拌工程においては、1 サイクル当たりのばっ気量が $1\text{m}^3 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{回}^{-1}$ 程度になるように、ばっ気強度とばっ気時間を設定することにより、ばっ気槽内の過ばっ気状態(ばっ気攪拌終了時の ORP が 100mV 程度以上)を防止することが可能となり、効率的な硝化・脱窒プロセスを実現できるような運転管理を行うことができることが示唆された。

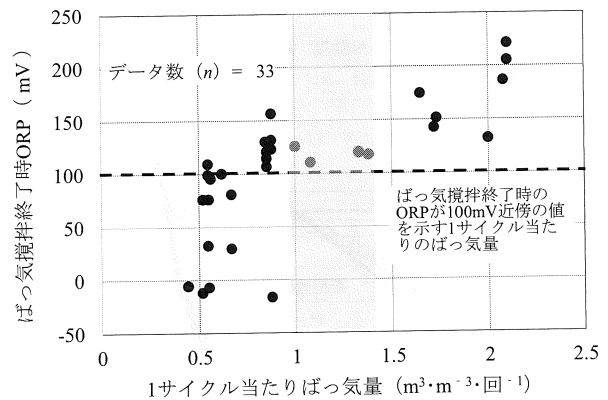


Fig.7 1 サイクル当たりばっ気量とばっ気攪拌終了時 ORP の関係
Relation between amount of aeration and ORP at aeration time in aeration tank

4.3 窒素除去性能の支配因子と定式化

ばっ気槽内は完全混合流であり、T - N 除去が 1 次反応に従う場合には、動力学モデルによる T - N 収支から次式が成り立つ (井出, 1976)。

$$Q \cdot (Ni - Ne) / Va = Kn \cdot Ca \cdot Ne \tag{1}$$

$$(Ni - Ne) / Ni = Kn \cdot Ca \cdot ta / (1 + Kn \cdot Ca \cdot ta) \tag{2}$$

ここで、 Q : 流入水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)、 Ni : ばっ気槽流入水の T - N 濃度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、 Ne : 沈殿槽流出水の T - N 濃度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、 Va : ばっ気槽の有効容量 (m^3)、 Ca : MLSS ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、 Kn : 窒素除去速度恒数 ($\text{L} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)、 ta : ばっ気槽の水理的滞留時間 (h)。

また、(2) 式を変形すると、

$$Ca \cdot ta \cdot Ni / (Ni - Ne) = Ca \cdot ta + 1 / Kn \tag{3}$$

となり、 $Ca \cdot ta \cdot Ni / (Ni - Ne)$ と $Ca \cdot ta$ の間に直線関係が存在すれば、(3) 式の成立が支持され、窒素除去速度恒数が求められる。

このため、ばっ気攪拌終了時の ORP が正の領域で攪拌終了時の ORP が -50mV より低い値を示す観測データを対象に、 $Ca \cdot ta \cdot Ni / (Ni - Ne)$ と $Ca \cdot ta$ の関係を検討したところ、両者の間には直線関係(決定係数: 0.999)が存在しており、窒素除去速度恒数として $4.74 \times 10^{-4} \text{L} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ が得

られた (Fig.8). この窒素除去速度恒数を (3) 式に代入すると, T - N 除去率と MLSS・水理的滞留時間の積の関係式として, (4) 式が導かれ, 窒素除去速度恒数が一定であると仮定すると, T - N 除去率 $(100 \cdot Ni / (Ni - Ne))$ はばっ気槽の MLSS・水理的滞留時間の積を説明変数とする双曲線関数式から概定できるものと考えられる.

$$Y_n = 4.74 \times 10^{-2} \cdot Ca \cdot ta / (1 + 4.74 \times 10^{-4} \cdot Ca \cdot ta) \quad (4)$$

ここで, Y_n : T - N 除去率 (%)

一方, 窒素除去性能には, ばっ気槽内の pH, DO濃度, 水温, 水素供与体が影響を与えていることが報告されている (Shindala and Parker, 1970; Crites and Tchobanoglous, 1998). そこで, 窒素除去速度恒数について, 実測値から (1) 式を用いて算定し, ばっ気槽内の水温による影響を検討したところ, 両者の間にバラツキは認められるものの, 正の相関 (相関係数: 0.838) が存在していることが確認された (Fig.9). また, ばっ気槽内における DO濃度についても, 窒素除去速度恒数との間には正の相関 (相関係数: 0.931) が存在しており, ばっ気槽内の DO濃度の増加に応じて高い値が得られていることが確認された (Fig.10).

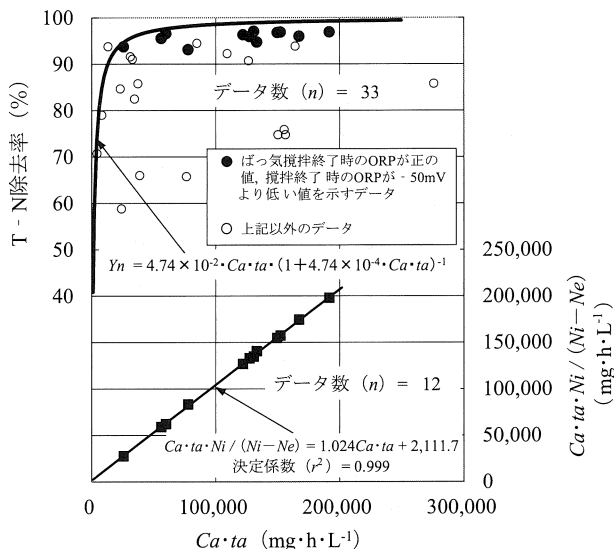


Fig.8 ばっ気槽 MLSS・水理的滞留時間と T - N 除去率の関係
Relation between MLSS・hydraulic retention time in aeration tank and T - N removal in XIV type rural sewerage facilities

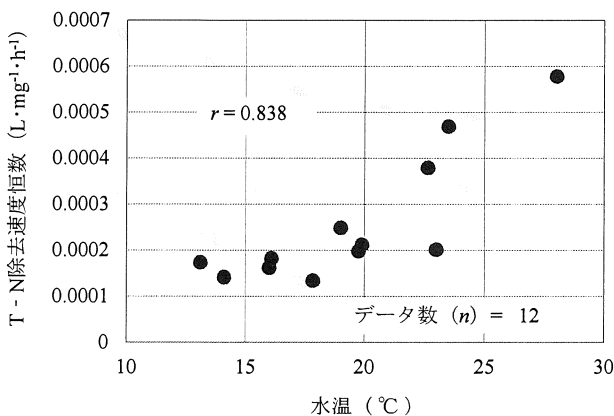


Fig.9 ばっ気槽の水温と T - N 除去速度恒数の関係
Relation between temperature in aeration tank and T - N removal reaction rate in XIV type rural sewerage facilities

しかしながら, ばっ気槽内の pH と窒素除去速度恒数の間には, Fig.11 に示すように明瞭な相関関係は存在していなかった. これは, 今回の調査では槽内 pH が 6.2~7.1 の範囲と脱窒反応の最適領域 (pH の範囲: 6.0~8.0) の近傍で, 変化範囲が大きくなかったことから, pH による影響が現れなかったものと推察される (下水・廃水・汚泥処理ガイドブック編集委員会, 1982). さらに, 水素供与体の指標

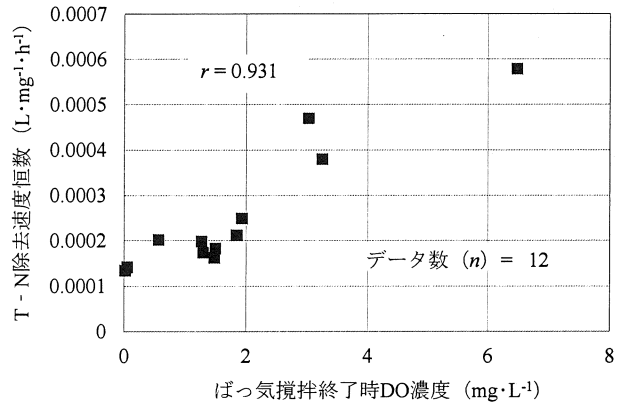


Fig.10 ばっ気槽のばっ気槽終了時 DO と T - N 除去速度恒数の関係

Relation between DO in aeration tank and T - N removal reaction rate in XIV type rural sewerage facilities

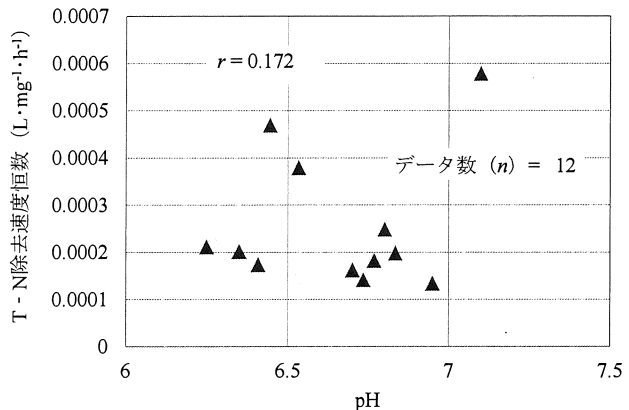


Fig.11 ばっ気槽の pH と T - N 除去速度恒数の関係

Relation between pH in aeration tank and T - N removal reaction rate in XIV type rural sewerage facilities

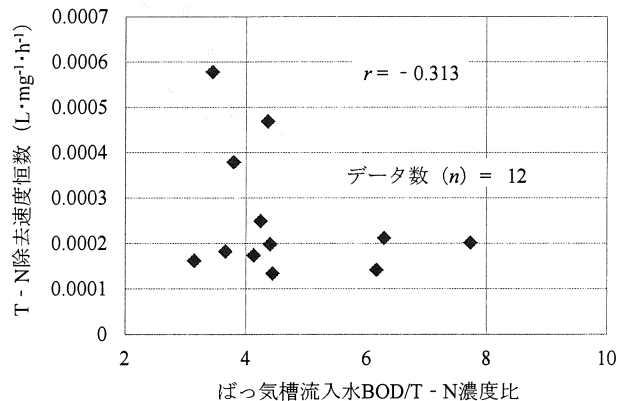


Fig.12 ばっ気槽流入水 BOD/T - N と T - N 除去速度恒数の関係
Relation between influent BOD/T - N in aeration tank and T - N removal reaction rate in XIV type rural sewerage facilities

として流入水の BOD/T-N 濃度比が挙げられていることから、ばっ気槽流入水の BOD/T-N 濃度比と窒素除去速度恒数の関係を検証したが、両者の間についても明瞭な相関は認められなかった (Fig.12)。BOD/T-N 濃度比が概ね 3 以下の条件下では、窒素除去性能に影響を与えるとされているが、今回の調査では BOD/T-N 濃度比が概ね 3 以上の値となっていることから、両者の間には明瞭な相関が存在しなかったものと考えられる (村田, 1992)。

このように、通常の運転状況においては、pH と BOD/T-N 濃度比は窒素除去速度恒数の影響要因になっていない一方で、槽内水温やばっ気槽終了時の DO は窒素除去速度恒数に影響を与えていることが確認されたことから、窒素除去速度恒数について、この両者を説明変数として重回帰分析 (加法式と乗法式) による定式化を試みたところ、次式が導かれる。

$$Kn = 1.02 \times 10^{-5} \cdot Te + 5.93 \times 10^{-5} \cdot Do - 5.20 \times 10^{-5} \quad (5)$$

$$Kn = 5.50 \times 10^{-6} \cdot Te^{1.27} \cdot Do^{0.12} \quad (6)$$

ここで、 Te : ばっ気槽内の水温 (°C)、 Do : ばっ気槽終了時の DO 濃度 ($\text{m} \cdot \text{L}^{-1}$)。

(5) 式と (6) 式に係る自由度調整重相関係数は、それぞれ 0.891, 0.937 と乗法式の相関係数は加法式に比較して高い値を示しており、窒素除去速度恒数は槽内水温とばっ気槽終了時 DO 濃度を説明変数とする重回帰式から推定できるとともに、加法式に比べて乗法式を用いた方が高い精度で得られることが示された。そこで、T-N 除去率の説明式として、乗法式重回帰式の (6) 式を (3) 式に代入すると、(7) 式が求められる。

$$Yn = 5.50 \times 10^{-4} \cdot Te^{1.27} \cdot Do^{0.12} \cdot Ca \cdot ta / (1 + 5.50 \times 10^{-6} \cdot Te^{1.27} \cdot Do^{0.12} \cdot Ca \cdot ta) \quad (7)$$

(7) 式に係る自由度調整重相関係数は Fig.13 に図示したように 0.965 であり、各説明変数単独による除去率との相関係数に比較して高い値が得られた。また、平均二乗平方根誤差 (RMSE) についても 0.79% と 1% 以内の値となっており、T-N 除去率の実測値と計算値はよく一致しているといえる。このことから、ばっ気槽内がばっ気槽終了時に

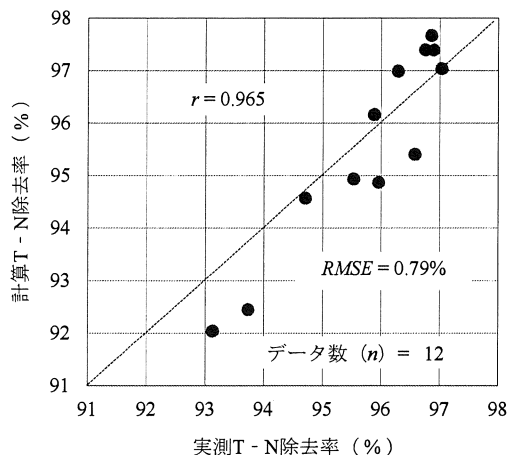


Fig.13 T-N 除去率の実測値と計算値

Relation between observed T-N removal and calculated T-N removal in XIV type rural sewerage facilities

好気状態、攪拌終了時に嫌気状態で硝化・脱窒素作用が発揮されている場合には、窒素除去は完全混合流による 1 次反応に従っていると同時に、ばっ気槽内の MLSS, 水温, ばっ気槽終了時 DO 濃度, 水理学的滞留時間は窒素除去性能の支配因子となっており、これらを説明変数とする双曲線関数式から推定できるものと考えられる。

4.4 窒素除去性能確保のための設計・管理への反映

連続流入間欠ばっ気活性汚泥方式の農業集落排水施設について、窒素除去性能の定式化が図られたことから、この知見を活用して、設計・管理への留意事項について考察した。まず、ばっ気槽終了時の ORP 値を 0~100mV の範囲 (ばっ気槽終了時に酸化状態、攪拌終了時には還元状態とする管理条件) に維持するためには、Fig.14 に図示したように 1 サイクルのばっ気槽時間が 40min を超えないように設定することを通じて、ばっ気槽終了時の DO 濃度が $1.0 \sim 2.0 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 程度となるような運転条件にすることが必要であるといえる。このことを踏まえ、水理学的滞留時間による T-N 除去率の影響について、ばっ気槽内水温の実測値も勘案して、 $12 \sim 28^\circ\text{C}$ の範囲で 4°C 毎に変化した場合の試算結果を例に検証した。なお、算定に際しては、

(7) 式を用いるとともに、ばっ気槽内の MLSS 濃度は管理諸元である $3,000 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ と仮定し、ばっ気槽終了時の DO 濃度は $2.0 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ とした。T-N 除去率は、水理学的滞留時間の増加に対応して高くなるとともに、水理学的滞留時間が同じ場合には槽内水温の上昇に従って高い値の除去率が得られている (Fig.15)。T-N 除去率は、槽内水温の上昇に対応して高い値を示すものの、その増加割合は槽内水温の値が大きくなるに従って小さくなっている。また、ばっ気槽内の水温が $12 \sim 28^\circ\text{C}$ の範囲にある場合には、設計水理学的滞留時間 (27h) を確保することにより、設計除去率である 65% 以上の窒素除去性能を満足できるものと考えられる。そこで、槽内水温が 20°C 、また、ばっ気槽終了時の DO 濃度が $1.0 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、又は $2.0 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ であると仮定し、水理学的滞留時間を 10h, 20h, 27h (設計諸元) の 3 ケースに変化させた場合の試算結果を例にして、MLSS 濃度による窒素除去性能への影響を検証した。T-N 除去率は、

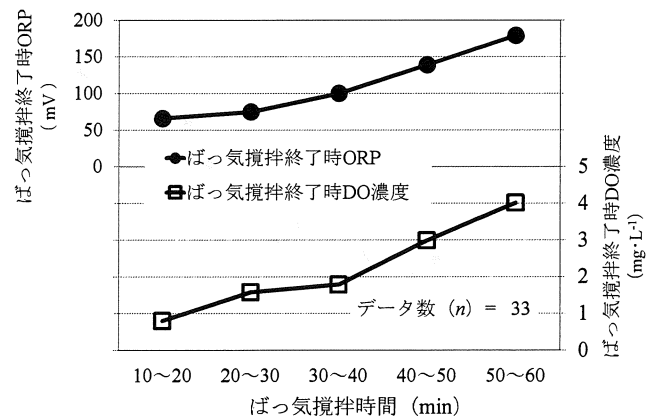


Fig.14 ばっ気槽時間とばっ気槽終了時の ORP・DO 濃度の関係
Relation between aeration time and ORP / DO in aeration tank

MLSS 濃度の増加に対応して高い値を示すとともに、同じ MLSS 濃度の場合には水理的滞留時間、ばっ気槽終了時 DO 濃度が大きい方が高くなっており、ばっ気槽内の MLSS 濃度を管理諸元値 ($3,000\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) に維持することやばっ気槽終了時の DO 濃度が $1.0\sim 2.0\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 程度となるように運転条件を設定することを通じて、設計除去率 (65%以上) の確保を図ることができるものと考えられる (Fig.16).

このように、新施設において所要の T - N 除去率を確保するためには、流入水の水温と流入負荷に応じて、(7) 式に目標 T - N 除去率と管理 MLSS 濃度・ばっ気強度を与え、ばっ気槽の必要容量、ばっ気槽時間・攪拌時間を適切に設定することが重要であることが示唆された。また、既存施設においては、流入水の水温と流入負荷に応じて、目標 T - N 除去率と水理的滞留時間を (6) 式に与えることにより、MLSS 濃度、ばっ気槽時間・攪拌時間、ばっ気強度等の運転操作諸元を適切に設定することが必要であると考えられる。

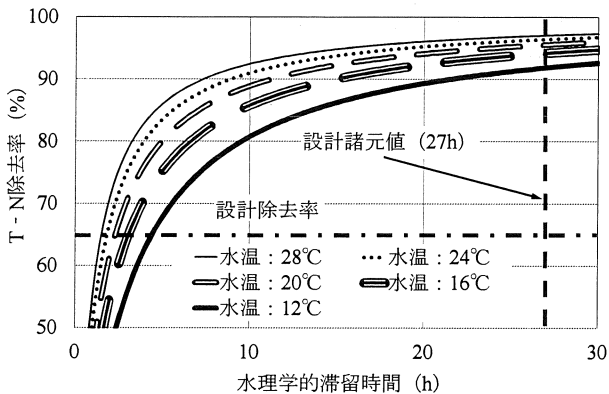


Fig.15 ばっ気槽水理的滞留時間と T - N 除去率の関係

Relation between hydraulic retention time in aeration tank and T - N removal in XIV type rural sewerage facilities

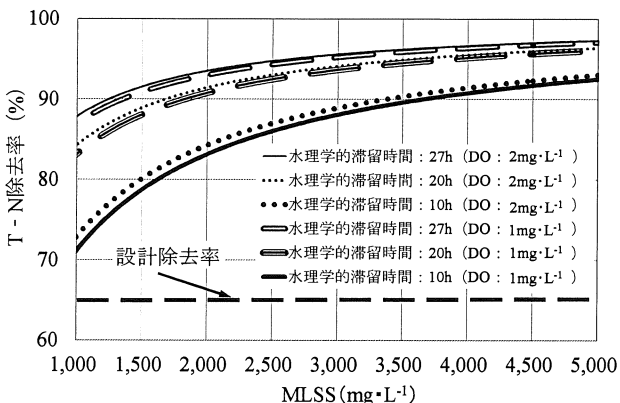


Fig.16 ばっ気槽 MLSS と T - N 除去率の関係

Relation between MLSS in aeration tank and T - N removal in XIV type rural sewerage facilities

5. まとめ

本研究では、連続流入間欠ばっ気活性汚泥方式の農業

集落排水施設の窒素除去性能とその影響要因について、調査データを用いた統計解析等による検討を行っており、得られた結果は以下のとおりである。

- ① 窒素除去性能には、硝化・脱窒工程でのばっ気槽内の酸化還元電位が大きく関与しており、安定した除去性能を確保するためには、ばっ気槽終了時は酸化状態 (ORP 値で 100mV 程度) に、また、攪拌終了時には着実に還元状態 (ORP 値で $-50\sim -200\text{mV}$ の範囲) となるような運転・管理条件を設定することが重要であることが確認された。
- ② 窒素除去性能には、ばっ気槽内の MLSS と水理的滞留時間が影響を与えており、ばっ気槽内の MLSS、水温、ばっ気槽終了時 DO 濃度、水理的滞留時間を説明変数とする双曲線関数式から T - N 除去率を推定できるものと考えられる。
- ③ 窒素除去性能の安定を図るためには、流入水の水温と流入負荷に応じて水理的滞留時間を確保するとともに、ばっ気槽内の MLSS 濃度、ばっ気槽時間・攪拌時間、ばっ気強度等の管理諸元を適切に設定することの重要性が示唆された。

本研究での連続流入間欠ばっ気活性汚泥方式の農業集落排水施設の窒素除去性能に関する検討結果が、今後、農業集落排水施設の適切な設計諸元の設定や管理手法の確立等に反映されることが期待される。

謝辞：本研究に当たっては、北尾高嶺豊橋技術科学大学名誉教授にご助言を頂くとともに、(社) 地域環境資源センターの関係各位に多大の御援助と御協力を頂いたことを記し、深甚の感謝を表します。

引用文献

- Crites, R. and Tchobanoglous, G. (1998) : *Small and Decentralized Wastewater Management Systems*, WCB/McGraw-Hill, 437-445.
- 下水・廃水・汚泥処理ガイドブック編集委員会 (1982) : 下水・廃水・汚泥処理ガイドブック, 理工新社, p.537.
- 井出哲夫 (1976) : 水処理工学 - 理論と応用 -, 技報堂, p.220.
- 村田恒雄 (1992) : 下水の高度処理技術, 理工図書, 207-210.
- 中野拓治 (2001) : 生物膜法の農業集落排水施設における流入特性と除去性能に関する研究, 豊橋技術科学大学学位論文, 21-22.
- 日本農業集落排水協会 (1998a) : 日本農業集落排水協会 XIV₉₆ 型施設設計指針, 43-45.
- 日本農業集落排水協会 (1998b) : 農業集落排水施設維持管理マニュアル : 日本農業集落排水協会 XIV 型編, 70-82.
- Shindala, A. and Parker, J.E. (1970) : *Water Work and Waste Engineering*, 7(3), 47-49.
- 谷山重孝 (2000) : 新しい水環境の創出, 農山漁村文化協会, 181-189.

[2011. 1. 4. 受稿, 2012. 5. 9. 閲読了]

[この研究論文に対する公開の質疑あるいは討議(4,000字以内, 農業農村工学会論文編集委員会あて)は, 2012年12月24日まで受付けます.]

Study on Characteristics and Design, Operational Consideration on Nitrogen Removal in Rural Sewerage Facilities with Intermittent Aerobic Suspended-Growth Processes

NAKANO Takuji and YASUMOTO Jun

Faculty of Agriculture, University of The Ryukyus, 1 Senbara, Nishihara, Okinawa 903-0213, JAPAN

Abstract

Nitrogen removal performance was investigated by using observed data in rural sewerage facilities with intermittent aerobic suspended-growth processes. It was found that the effective nitrification-denitrification could be achieved by maintaining aeration time, aeration rate at aeration phase and controlling stir time at stir without aeration phase in cyclic operating conditions. The nitrogen removal reaction was assumed to be governed by first-order function with complete-mix system of biological treatment process. It was recognized that the nitrogen reaction rate was influenced by the temperature and dissolved oxygen (DO) concentration at aeration phase in aeration tank. The nitrogen removal was confirmed to be dependent on mixed-liquor suspended solids (MLSS), hydraulic retention, temperature, and DO concentration at aeration phase in aeration tank. The relationship between nitrogen removal and hydraulic retention time, MLSS could be modeled as the form of rectangular hyperbolas. On the base of the influent temperature, the control of MLSS, hydraulic retention, stir time and amount of aeration in aeration tank are important factors in maintaining stable nitrogen removal efficiency.

Key words : *Rural sewerage facilities, Intermittent aerobic suspended-growth processes, Nitrogen removal, Affecting factors, Nitrification-denitrification processes, Design and operation factors*