ヨシ植栽水路における充填担体の空隙率が 水路の窒素・リン除去能力に及ぼす影響

塩田 勉* 山田 一裕** 千葉 信男** 須藤 隆一**

The Effect of Porosity of Packed Media on Nitrogen and Phosphorus Removal in Reed Bed Treatment System

Tsutomu SHIODA*, Kazuhiro YAMADA**, Nobuo CHIBA** and Ryuichi SUDO**

* Tokyo Metropolitan Research Institute for Environmental Protection(Previously, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Tohoku University), 1-7-5, Shinsuna, Koto-ku, Tokyo 136-0075 Japan

** Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Tohoku University, 06, Aramaki aza Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-8579 Japan

Abstract

In order to solve the eutrophication problem in closed water area, it is well-known fact that to reduce the nitrogen and phosphorus is one of the important ways. However, such nutrients in present sewage systems are not sufficiently removed. The objective of this study is to propose a treatment system for secondary effluent by using reed bed treatment system with different packed media. The effect of porosity of packed media on nitrogen and phosphorus removal was discussed.

The results indicated that the removal rate of nitrogen in reed bed treatment system packed with gravel was higher ($1.54 \text{ gN} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) than those packed with sand and net material. According to numeral analysis 50 percent of nitrogen in the sand system was removed due to adsorption on sand, whereas in the gravel and net material systems 60 percent of it was removed by biological denitrification at the root zone of reed. It was found that nitrification-denitrification at the root zone of reed was important way for nitrogen removal, and the nitrogen removal at the root zone was effectively carried out as the porosity of packed media increased. On the other hands 80 percent of phosphorus in the sand and gravel systems was adsorbed on packed media.

Key words: nitrogen removal, porosity, reed bed, root zone, nitrification-denitrification

1. はじめに

閉鎖性水域における富栄養化が問題となっており、未だに問題の解決を見ず、内湾や湖沼では頻りにアオコ等が発生している。この原因は、富栄養化の原因物質である窒素・リンの負荷量が減少しないためであり、植物プランクトンの増殖を抑えるためには、窒素・リン負荷の削減が急務である¹⁾。

負荷削減の方法としては、排出源からの負荷量を削減することが重要である。そのためには、下水道や合併浄化槽によって処理された排水をさらに高度処理し、排水中の窒素・リン濃度を低下させることが必要である。近年一部の地域で高度処理がおこなわれるようになったが、高度処理人口は全処理人口の7.6%にすぎず、ほとんど普及していない²⁾。高度処理法には様々な方法が考案されているが画期的な方法はなく、コストが安く、維持管理の容易なものが求められる。

そのような要件を満たす高度処理法として、化石エネルギーを用いず自然の浄化機能を利用・強化するという

エコテクノロジーの活用が注目されている³⁾。そのひとつに、大型水生植物ヨシを利用した水質浄化が挙げられ、多くの研究がおこなわれている^{4) 5)}。水生植物の中でも特にヨシは、光合成で生成した酸素を体内の通気組織を通じて根へ輸送する能力に優れており、根から放出される酸素によって好氣的となった根圏における活発な硝化-脱窒により、優れた窒素除去能力を有する⁶⁾ (Fig. 1)。

本研究では、このように高い窒素除去能力を有するヨシを高度処理に適用するため、浄化能力向上の手法として水路の支持担体の空隙率に着目した実験をおこなった。空隙率を高めることにより、透水性向上による処理水量の確保と、排水とヨシ根圏微生物の接触率向上による根圏微生物の窒素除去能力の向上を図った。具体的には、空隙率の異なる担体を充填したヨシ植栽水路を用いて、下水処理水中の窒素・リン除去実験をおこなった。さらに、各担体を用いた室内回分実験等から、窒素・リン除去に関する反応速度を算出し、それらを基にした数値計算をおこなって、空隙率の変化による窒素・リン除去機構の違いについて検討した。

* 東京都環境科学研究所 (前 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻) 〒136-0075 東京都江東区新砂1-7-5

** 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06

Fig.1 Process of nitrogen removal at the root zone of reed.

2. 実験方法

2.1 パイロットプラントにおける窒素・リン除去実験

2.1.1 実験装置

パイロットスケールのヨシ植栽水路を用いた実験（以下、現場実験）は、宮城県内の下水処理場の敷地内でおこない、実際の2次処理水を用いて窒素・リンの除去能力を検討した。担体の空隙率が水路の浄化能力に及ぼす影響を調べるため、水路に充填した担体は砂・礫・網状担体の3種類とし、空隙率はそれぞれ30%, 45%, 99.5%であった。ここで網状担体とは、空隙率の非常に大きな人工樹脂ろ材である。実験水路は、Fig. 2に示す水槽を直列に接続したものとし、砂系・礫系では水槽を2槽、網状担体系では4槽を直列に接続した。この水路に、下水の2次処理水（T-N15~20mg・l⁻¹、T-P1.5~2.5mg・l⁻¹）を浸透流れ方式で流入させた。各系への水面積負荷は礫系・網状担体系が60cm・d⁻¹、透水性の悪い砂系は18cm・d⁻¹とし、この時の各系の水理学的滞留時間は、砂系600min、礫系200min、網状担体系120minであった。

1997年6月にヨシを160本・m⁻²の密度で各槽に植栽してから実験を開始し、ヨシが完全に枯れた12月まで10日に1回程度の間隔で採水した。

2.1.2 測定項目

ヨシの生育については、各系のヨシの平均高さを経時的に測定した上、ヨシの生育の止まった10月中旬に各系のヨシの総本数を計測し、密度を測定した。また、同時に体内のN・P含量を元素分析により測定した。

窒素・リン除去能力については、2次処理水中に懸濁物がほとんど無いことから、溶存態としてDTN・DTPで評価した。採水した試料は0.45μmメンブランフィルターでろ過し、DTN・DTPについてはペルオキシ2硫酸カリウムと水酸化ナトリウムによる同時分解後、テクニコン社のオートアナライザーⅡを用いて、またNH₄-N・NO_x-Nについてはそれぞれインドフェノール法とCd-Cu還元カラム法により、ブランルーベ社のトラックス800を用いて、自動分析した。元素分析は、窒素についてはYANA

Fig.2 Scale of the water tank used in pilot plant experiment.

KOのCHNコーダーMT-5型で測定、リンについては上記のDTP測定法に準じた。

2.2 数値計算を用いた窒素・リン除去機構の算定

2.2.1 解析手法

ヨシを用いた水質浄化では、ヨシ根圏微生物による硝化-脱窒が重要な窒素除去機構であると考えられているが、既往の研究においては、ヨシを植栽した系と無植栽系の浄化能力の差からヨシの吸収量を差し引いたものを、根圏における硝化-脱窒量と算定してきた⁷⁾。しかしこの方法では、硝化-脱窒の絶対量は分かってもそのメカニズムは全くの未解明のままである。

そこで本研究では、ヨシ根圏における硝化-脱窒能力を定量的に算出し、水路充填担体の空隙率変化による窒素・リン除去機構の違いを明らかにするため、数値計算による解析をおこなった。

まず、現場実験の実測データと室内回分実験の結果をもとに、根圏微生物の硝化-脱窒速度を除いた、窒素・リン除去に関する各反応速度を算出した。そして、それらの反応速度を用いた数値計算をおこない、計算値と実測値を比較することにより、ヨシ根圏微生物による硝化-脱窒速度の算定をおこなった。

2.2.2 各反応速度の算出

根圏微生物による硝化-脱窒以外の窒素・リン除去機構としては、①ヨシによる吸収②担体への吸着③担体付着微生物による硝化-脱窒が挙げられる。これらの反応速度の算出方法を以下に示す。

①元素分析の結果と生体重量より全吸収量をもとめ、測定期間で除して平均吸収速度を算出した。

②現場実験装置では、冬期においても窒素・リンの除去が進んでおり、担体の吸着能力は飽和に達していないと判断できる。担体への吸着速度は、微生物活性とヨシの生育が停止する冬期においては生物学的除去が機能しないことから、現場装置の冬期における平均除去速度を吸着速度とした。

③担体付着微生物による硝化-脱窒速度を算出するために、i)DO消費速度定数・ii)硝化速度・iii)脱窒速度・iv)溶出速度の4つを室内回分実験から求めた。各回分実験には現場実験装置から採取した担体と実際の2次処理水を用い、10のガラス容器に担体を充填して20℃の恒温槽にて実験をおこなった。

i)DO消費速度定数の算定にはあらかじめ十分曝気した処理水を用い、定時に採水した試料のDOを固定法によ

Table 1 Density, mean height, weight, and nutrient contents of reeds used in the pilot plant experiments.

packed media	density (shoots·m ⁻²)	mean height (cm)	section of reed	weight ratio(%)		dry weight (g·m ⁻²)	content(g·m ⁻²)	
				N	P		N	P
sand	565	106	overground	1.98	0.13	1774	31.8	2.6
			underground	1.67	0.24	645	9.8	0.8
gravel	410	115	overground	2.32	0.16	1418	33.0	2.6
			underground	2.82	0.29	312	8.8	0.7
net material	303	74	overground	2.58	0.24	557	14.2	1.2
			underground	4.01	0.29	111	4.4	0.4

り測定した。そして、DO濃度の減少曲線を指数関数に回帰することにより、DO消費速度定数を算出した。

ii)硝化速度iv)溶出速度の算定は連続曝気条件下でおこなった。定時に採水した試料のNO_x-N濃度変化を直線回帰することにより硝化速度を算出した。また、硝化によるNH₄-N減少量から実際のNH₄-N減少量を減ずることによりNH₄-N溶出量を算出し、溶出量の変化を直線回帰することで溶出速度を算定した。

iii)脱窒速度の算定には、あらかじめN₂ガスで十分に脱気して嫌氣的 (DO: 0.1mg·l⁻¹以下) とした処理水を用い、さらに硝化抑制剤としてATU (アシルチオ尿素) を2mg·l⁻¹になるように添加した。定時に採水した試料のNO_x-N濃度変化を直線回帰することにより、脱窒速度を算出した。

3. 結果及び考察

3.1 現場実験水路におけるヨシの生育

ヨシの枯れ始めた10月中旬における、現場実験装置のヨシの密度、平均高さ、部位別の栄養塩含有率、生体重量、栄養塩含有量の測定結果をTable 1に示す。砂系と礫系ではヨシの生育は良好で差が見られなかったことから、この程度の空隙率の差であれば生育に差はないと考えられた。しかし、網状担体系では夏季にアブラ虫が大量に発生したため、生育が阻害されてしまった。ヨシの生育が悪いためにアブラ虫が発生したのか、その逆であるのかは不明であるが、同じようにヨシ植栽水路に網状担体を用いた加藤ら⁸⁾は、網状担体系でもヨシの生育は砂系と同等に良好であったと報告しており、網状担体における空隙率とヨシの生育の関係についてはさらなる検討が必要である。

栄養塩含有率については、担体の空隙率の増加に従って栄養塩含有率も増加しており、空隙率とヨシの栄養塩蓄積能力の間に相関があることが明らかとなった。

3.2 現場実験水路における浄化能力

3.2.1 窒素除去

ヨシ生育期間の8月から10月までにおける、現場水路の流入水および流出水中のDTN濃度の経時変化をFig. 3に示す。Fig. 3から計算された各系の平均DTN除去率は砂44%、礫16%であった。砂系の滞留時間は10hourと、礫系の滞留時間3.3hourより長いこと高い除去率が得られている。滞留時間を考慮し、各系別に平均DTN除去速度を算出したところFig. 4に示す経時変化が得られた。ヨシ生育期間内における平均の窒素除去速度は礫系>砂系>網状担体系の順となり、それぞれの平均除去速度は1.54gN·m⁻²·d⁻¹、1.35gN·m⁻²·d⁻¹、0.44gN·m⁻²·d⁻¹で

Fig. 3 Concentration of DTN in the influent and effluent of the pilot plant system.

Fig. 4 Variation of DTN removal rate in the pilot plant system.

あった。特に礫系と砂系の除去速度は、既往の文献値 (0.7~1.3gN·m⁻²·d⁻¹)^{4) 5)} を上回る値が得られた。網状担体系の除去速度が低かったのは、ヨシの生育が悪く水質浄化能力が十分に発揮されなかったためであると考えられる。ただし、砂・礫系ではヨシによる除去だけでなく、担体へのNH₄-N吸着による除去も働いており、土壌の粒径が小さくなるほど吸着作用は大きくなるといわれている⁹⁾。一方で、礫系が砂系よりも高いN除去能力を示した要因としては、透水性に優れているため流量を多く取れること、空隙が大きいことヨシ根圏微生物による硝化-脱窒が効果的に発揮されたことが考えられる。

3.2.2 リン除去

現場水路の流入水および流出水中のDTP濃度の経時変化をFig. 5に示す。Fig. 5から計算された各系の平均DTP除去率は砂34%、礫18%、網状担体2.5%であり、滞留時間が10hourと長い砂系で高い除去率が得られている。滞留時間を考慮し、各系別に平均DTP除去速度を算出したところFig. 6に示す経時変化が得られた。ヨシ生育期間

Fig. 5 Concentration of DTP in the influent and the effluent of the pilot plant system.

Fig. 6 Variation of DTP removal rate in the pilot plant system.

内における平均リン除去速度は礫系>砂系>網状担体系の順となり、それぞれ $0.22\text{gN}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $0.14\text{gN}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $0.03\text{gN}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ であった。礫系と砂系に比べて網状担体系の除去速度が低かった要因としては、ヨシの生育不良によるリン吸収能力の低下の他に、担体のリン吸着能力の有無が挙げられる。砂や礫は高いリン吸着能力を持つが、網状担体にはリン吸着能力が無いいため、ほとんどリンの除去がおこなわれなかったと推察される。

3.3 数値計算による窒素・リン除去機構の算定

3.3.1 回分実験結果

水路充填担体の空隙率変化による窒素・リン除去機構の違いを明らかにするため、数値計算による解析をおこなった。そのために必要な各反応速度定数を、回分実験と元素分析により算出した。その結果をTable 2に示す。担体表面に付着している微生物の働きによる①～④については、ほぼ砂>礫>網状担体の順となっている。これは、単位体積当たりの表面積が大きい担体ほど、付着できる微生物量が増えるためであると思われる。 $\text{NH}_4\text{-N}$ の吸着は担体の陽イオン交換によりおこなわれるが、網状担体には交換能力がないため0となった。また、網状担体のヨシの吸収速度が小さいのは、ヨシの生育不良によるためである。

3.3.2 計算の基礎方程式

Table 2の各反応速度を用いて、根圏微生物の硝化-脱窒以外の除去機構による窒素除去の数値計算をおこなった。計算に当たっては、計算を容易におこなうため水理条件をできるだけ簡略化した。すなわち、現場装置の水質は流下方向にのみ変化する1次元流れとし、鉛直方向に

Table 2 Parameters concerned to nitrogen removal

parameter	sand	gravel	net material
β_{DO} :DO consumption rate ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	0.03	0.014	0.002
β_{NH_4} :nitrification rate ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	0.02	0.01	0.002
β_{NH_4} :dissolution rate ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	0.03	0.009	0.0002
β_{NH_4} :adsorption rate ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	0.007	0.009	0
β_{NH_4} :adsorption rate of reed ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	0.0015	0.0015	0.0005
β_{NO_x} :denitrification rate ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	0.004	0.005	0.0001

水質は均一であるとする。担体の性状は槽内で一様であり、滞留時間から平均流速が算出できるため、このような仮定が成り立つ。また、流入水質は一定濃度 ($\text{NH}_4\text{-N}$ $15\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 、 $\text{NO}_x\text{-N}$ $7\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) とし、溶存態有機窒素 (DON) と懸濁態窒素はほとんど無いことから、 $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_x\text{-N}$ の和がDTNであるとした。すると、基礎方程式は(1)式に示すような、反応項を含む1次元の移流拡散方程式で表される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u \frac{\partial C}{\partial x} + D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + R \quad (1)$$

C: 物質の濃度、u: 流速、D: 拡散係数、R: 反応項

右辺の反応項では、Fig. 1に示した過程によって窒素の形態変化や除去がおこなわれる。拡散係数Dは毛利ら¹⁰⁾の報告に基づいて算定した。また、DO消費速度はDO濃度に比例する1次反応とし、硝化・溶出反応は好気条件下で起こるため、DO濃度の低下によりMonod型で速度低下するものとした。脱窒速度はDO濃度と $\text{NO}_x\text{-N}$ 濃度により速度低下するものとし、その速度低下は既往の文献¹¹⁾から引用した(2)式及び(3)式に従うものとする。

$$\beta'_{\text{NO}_x} = \frac{C_{\text{NO}_x}}{\kappa_{\text{NO}_x} + C_{\text{NO}_x}} \beta_{\text{NO}_x} (C_{\text{DO}} < 0.48) \quad (2)$$

$$\beta'_{\text{NO}_x} = \frac{1}{1 + 32 \cdot (C_{\text{DO}} - 0.48)} \cdot \frac{C_{\text{NO}_x}}{\kappa_{\text{NO}_x} + C_{\text{NO}_x}} \cdot \beta_{\text{NO}_x} (C_{\text{DO}} \geq 0.48) \quad (3)$$

κ_{NO_x} : 半飽和定数、 β_{NO_x} : 脱窒速度

計算は(1)式を土木研究所の方法に従って差分化しておこなった。差分メッシュは安定条件を考慮し $\Delta x=5\text{cm}$ 、 $\Delta t=1\text{min}$ と設定し、数値拡散誤差を補正するため数値拡散係数による拡散係数の補正をおこなった。計算より、ヨシ根圏微生物の硝化-脱窒作用を除く窒素除去機構による除去量が算定できる。この計算値と実測値を比較することから、根圏微生物による硝化-脱窒速度を算定する。

リンについては除去機構が担体への吸着とヨシによる吸収であるので数値計算はおこなわず、実測値から算出した吸着速度と、元素分析から算出した総吸収量を実験期間で除した吸収速度から除去機構を解析した。

なお、ここで用いる実測値とは採水を開始した8月初旬からヨシの枯れ始めた10月中旬までの測定値の平均値である。この間、流入水の水温は $25\sim 20^\circ\text{C}$ 、流出水の水温は $25\sim 15^\circ\text{C}$ の範囲で変動したが、計算を容易にするため各反応速度は温度の関数とせず、測定期間中の平均的な水温と思われる 20°C でおこなった回分実験の反応速度 (Table 2) をそのまま用いた。

3.3.3 計算値と実測値の比較

(i) 砂系

Fig. 7 Relationship between measured and calculated concentrations of $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_x\text{-N}$ and DO in sand system.

Fig. 8 Relationship between measured and calculated concentrations of $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_x\text{-N}$ and DO in gravel system.

Fig. 9 Relationship between measured and calculated concentrations of $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_x\text{-N}$ and DO in net material system.

計算値と実測値をFig. 7に示す。砂系では急速なDOの低下が起こり、嫌気的環境となっていることがわかった。これは、現場装置の第1槽、第2槽の流出水の実測DO濃度がほとんど $0\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ であったことと一致する。 $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_x\text{-N}$ の減少量を実測値と比較してみると、ほぼ一致した。すなわち、砂系での窒素除去に占めるヨシ根圏微生物による硝化-脱窒の割合はごく小さく、計算から吸着が最も大きな窒素除去機構となっていることが明らかとなった。

(ii) 礫系

計算の結果、礫系においてもFig. 8に示すように急速な

DO消費が起きており、計算値では硝化が起こらず、2次処理水中に有機物がほとんど存在しないことから脱窒も進んでいない。実測値と比較すると、現場装置の流出水の実測DO濃度はほとんど $0\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ であり計算値と一致するが、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_x\text{-N}$ はFig. 8に示すように計算値以上に減少している。すなわちこの差が、ヨシ根圏微生物の硝化-脱窒によるものであると考えられる。

そこで、根圏における硝化・脱窒速度をそれぞれ $\beta_{\text{硝化}}$ ・ $\beta_{\text{脱窒}}$ として数値計算に導入し、計算値と実測値が等しい除去速度となる $\beta_{\text{硝化}}\cdot\beta_{\text{脱窒}}$ を算出した。導入に当たっては、根圏における硝化はヨシの酸素供給作用に基づいていることから、DO濃度の影響を受けない0次反応速度とし、また脱窒はDO濃度上昇により(2)(3)式に従って速度低下するものとした。その結果、根圏における硝化・脱窒速度としてそれぞれ $\beta_{\text{硝化}}=0.0021\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $\beta_{\text{脱窒}}=0.013\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ という値を得た。

(iii) 網状担体系

網状担体系の計算値では、流出水においてもDO濃度 $2\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ と算出されたが、現場の実測DO値は第3槽以降ほぼ $0\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ であった。そこで、DO消費速度定数を修正して第3槽流入時にDO濃度 $0\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ となるようにして $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_x\text{-N}$ を再計算したところ、Fig. 9に示す結果となった。 $\text{NH}_4\text{-N}$ については、実測値が計算値を上回る結果となったが、これは網状担体自体に遮光能力がないうえ、ヨシの生育が悪くヨシによる遮光効果も働かず、夏季において槽内に発生した藻類の分解により $\text{NH}_4\text{-N}$ が生成されたためであると考えられる。そこで $\text{NO}_x\text{-N}$ についてのみ、前述の手法で根圏における脱窒速度を算出したところ、 $\beta_{\text{脱窒}}=0.0036\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ が得られた。硝化速度は計算値が実測値を下回ったため算出できなかった。

3.4 窒素除去機構

根圏における硝化-脱窒速度を算定した結果、各系における窒素除去機構が解明された。その反応速度と除去に占める割合をTable 3に示す。砂系では除去の半分は吸着によるものであるが、礫では吸着の割合は20%に減少し根圏微生物による脱窒が56%を占めている。さらに網状担体系においては根圏微生物による脱窒が61%を占めている。この結果から、根圏微生物の脱窒による窒素除去機構は、支持担体の空隙率を高めることにより効果的に発揮されることが推察された。この脱窒能力を効果的に発揮するためには高い $\text{NO}_x\text{-N}$ 濃度を維持する必要があるが、ヨシは地上部の光合成で生成した酸素を通気組織を通じて根へ輸送しており、この酸素を用いて根圏で $\text{NH}_4\text{-N}$ の硝化がおこなわれ、 $\text{NO}_x\text{-N}$ が生成されている。その硝化能力についても、砂系と礫系の硝化速度の比較から、担体の空隙率が高い方が硝化能力が高いと推察され、根圏での硝化-脱窒能力は担体の空隙率を高めることにより効果的に発揮される可能性が示唆された。ここで、脱窒のための有機物の供給源はどこであるかという点、下水処理水中には有機物がほとんど存在しないため、ヨシの根から供給されていると考えられる。ヨシの根からは成長につれて様々な形の有機分泌物が放出されていることが明らかとなっており¹²⁾、これらの有機物が脱窒の際に水素供与体として働いたと思われる。

Table 3 Removal rates and ratios concerned to nitrogen

the ways of nitrogen removal		sand		gravel		net material	
		rate(mg·l ⁻¹ ·h ⁻¹)	ratio(%)	rate(mg·l ⁻¹ ·h ⁻¹)	ratio(%)	rate(mg·l ⁻¹ ·h ⁻¹)	ratio(%)
effect of materials	adsorption on materials	0.26	49	0.16	23	0	0
	nitrification in the surface of materials	0.60	-	0.42	-	0.10	-
	denitrification in the surface of materials	0.18	32	0.12	8	0.01	0
effect of reed	absorption by reed	0.10	19	0.09	13	0.03	39
	nitrification in the root zoon of reed	0	-	0.02	-	0	-
	denitrification in the root zoon of reed	0	0	0.96	56	0.22	61

Table 4 Removal rates and ratios concerned to phosphorus

the ways of phosphorus removal		sand		gravel		net material	
		rate(mg·l ⁻¹ ·h ⁻¹)	ratio(%)	rate(mg·l ⁻¹ ·h ⁻¹)	ratio(%)	rate(mg·l ⁻¹ ·h ⁻¹)	ratio(%)
effect of materials	adsorption on materials	0.03	79	0.05	87	0	0
effect of reed	absorption by reed	0.008	21	0.008	13	0.002	100

ただし、これら一連の硝化-脱窒反応は水温が高く微生物活性の高い期間には盛んに起こるが、水温の低下する冬期においてはほとんど機能しないものと思われる。冬期における水質維持のための対策は今後の課題であろう。

3.5 リン除去機構

実測値から得られた吸着速度と、元素分析から得られた吸収速度、そしてそれらの除去に占める割合をTable 4に示す。砂・礫系では担体への吸着が80~90%を占めているのに対し、網状担体系では100%がヨシによる吸収である。しかし、網状担体系のリン除去能力は砂・礫系に比べてはるかに低かった。これらのことから、リンの除去は主に担体への吸着によるものであり、その除去能力の差は空隙率の大小によるものではなく、担体自体の吸着能力の大小によるものであると考えられる。リンの吸着については鉄との酸化反応によるものであると報告されており、砂・礫中に含まれる鉄分による吸着であると推察される。

ヨシの生育の良かった砂・礫系においても、吸着に比べてヨシによる吸収量は少なく、ヨシによるリン除去効果は小さいといえる。リン除去のためにはリン吸着能力に優れた担体を使用する必要がある。

4. まとめ

下水の高度処理法としてヨシ植栽水路に着目し、特に水路の充填担体の空隙率が、水路の窒素・リン除去能力に及ぼす影響について検討した。担体として砂、礫、網状担体を用いた現場実験や数値計算をおこなった結果、以下の知見を得た。

1) 現場水路における窒素除去速度として礫系 $1.54\text{gN}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 、砂系 $1.35\text{gN}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 、網状担体系 $0.44\text{gN}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ を得た。数値計算により、砂系における窒素除去の50%が担体への吸着であるのに対し、礫系と網状担体系ではヨシ根圏微生物による脱窒が窒素除去の約60%を占めると算出された。このことから、窒素除去にはヨシ根圏微生物の硝化-脱窒が重要な役割を果たしており、この硝化-脱窒作用は担体の空隙率を高めることにより、効果的に発揮されると推察された。

2) 現場水路におけるリン除去速度は礫系 $0.22\text{gN}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 、砂系 $0.14\text{gN}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 、網状担体系 $0.03\text{gN}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ であった。数値計算によると、砂系・網状担体系においてはリン除去の80%以上が担体への吸着であり、

ヨシによるリンの除去能力は低いことが明らかとなった。高度処理施設として効率的なリン除去をおこなうためには、リン吸着能力の高い担体を用いる必要がある。

謝 辞

本研究を行うにあたり、実験装置の設置および実験の円滑な遂行に多大なるご協力を頂いた、宮城県仙塩流域下水道事務所および(財)宮城県下水道公社仙塩処理場の皆様にご心より謝意を表す。また、本研究の全般にわたる御指導とご協力を賜った国立環境研究所徐開欽博士に深甚なる謝意を表す。

(原稿受付 1998年10月28日)

(原稿受理 1999年1月25日)

参 考 文 献

- 1) 須藤隆一(1998)CO₂同様にN・Pも国別排出目標が必要—環境保全対策の方向, 月刊地球環境, 2, 4-8.
- 2) 安中徳二(1998)下水道整備の現状と今後の課題, 環境技術, 26, 30-33.
- 3) 山田一裕, 徐開欽, 須藤隆一(1998)循環と共生をめざした水環境の復元技術, 日本水処理生物学会誌, 33(2), 9-16.
- 4) R.Perfler and R.Haberl(1993)Actual experience with the use of reed bed system for wastewater treatment in single households, *Water Science Technology*, 28(10), 141-148.
- 5) 細見正明(1994)内陸湿地における自然浄化のメカニズムと浄化機能の積極的利用, 水環境学会誌, 17(3), 9-13.
- 6) K.K.Moorhead and K.R.Reddy(1988)Oxygen transport through selected aquatic macrophytes, *Journal of Environmental Quality*, 17, 138-142.
- 7) R.M.Gersberg et al(1986)Role of aquatic plants in wastewater treatment by artificial wetlands, *Water Research*, 20, 363-368.
- 8) 加藤智博(1996)ヨシ原の創出手法の確立及びその水質浄化機構の解明に関する研究, 東北大学修士論文, 110p.
- 9) Chr.Platzer and R.Netter(1998)Factors affecting nitrogen removal in horizontal flow reed beds, *Water Science Technology*, 29(4), 319-324.
- 10) 毛利光男, 細川恭史, 須田有輔(1997)礫充填層の損失水頭と縦分散係数, 水環境学会誌, 20, 532-538.
- 11) 中島拓男, 相崎守弘(1981)霞ヶ浦高入浜における脱窒, 国立公害研究所報告, 22, 89-97.
- 12) 西尾道徳(1989)土壌微生物の基礎知識, pp.84-111, 農山漁村文化協会.