人工ヨシ湿地における植栽基盤が下水処理水の 栄養塩除去に及ぼす影響

Effect of Planting Bed on Nutrient Removal from Sewage Treatment Water
by Constructed Reed Bed System

國枝晴子¹、李 先寧²、山田一裕³、千葉信男⁴、野村宗弘⁴、中野和典⁴、西村 修⁴、須藤隆一⁵

¹東北大学大学院工学研究科（現：東京都水道局）／〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06

²東南大学土木工程学院／〒210096 中国江蘇省南京市四牌楼2号

³岩手県立大学総合政策学部／〒020-0193 岩手県岩手郡滝沢村滝沢字菓子152-52

⁴東北大学大学院工学研究科／〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06

⁵埼玉県環境科学国際センター／〒347-0115 埼玉県北埼玉郡騎西町上種足914

HARUKO KUNIEDA¹, XIAN-NING LI², KAZUHIRO YAMADA³, NOBUO CHIBA⁴,
MUNEHIRO NOMURA⁴, KAZUNORI NAKANO⁴, OSAMU NISHIMURA⁴, and RYUICHI SUDO⁵

¹Graduate School of Engineering, Tohoku University

(Present, Bureau of Waterworks, Tokyo Metropolitan Government)

/ 6-6-06, Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, 980-8579, Japan

²College of Civil Engineering, Southeast University/ Si Pai Lou 2, Nanjing 210096, China

³Faculty of Policy Studies, Iwate Prefectural University

/ 152-52, Takizawa-aza-sugo, Takizawa, Iwate-gun, Iwate 020-0193, Japan

⁴Graduate School of Engineering, Tohoku University

/ 6-6-06, Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, 980-8579, Japan

⁵Center for Environmental Science in Saitama

/ 914 Kamitanadare, Kisaimachi, Kitasakitama-gun, Saitama 347-0115, Japan

Abstract

The objective of this study is to evaluate the constructed reed bed treatment system to remove nutrients from secondary effluent. The packed media, the removal characteristics and the optimum water surface loading were discussed.

The results indicated that the growing of the reeds was better and the nutrients removal rates were higher in constructed reed bed treatment systems packed with sand or gravel than in the system packed with net material. The maximum removal rates of DTN and DTP in the system packed with sand were $5.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ and $0.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ respectively when the water surface loading rate was set at a maximum of $0.38 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$, and those in the system packed with gravel were $6.6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ and $1.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ respectively when the water surface loading rate was set at $0.60 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$. It is clear that the low nutrients concentration of effluent can be obtained in the system packed with sand and the volume of treated effluent can be ensured in the system packed with gravel, revealing importance to choose the packed media according to treatment objectives.

Key words: secondary effluent, advanced wastewater treatment, ecosystem, eutrophication

1. はじめに

公共用水域における富栄養化は大きな社会問題になってから久しいが、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る。累進的に進行する富栄養化を防止するために窒素・リンを除去可能な下水高度処理の果たす役割は重要なものとなっている。

しかし、現状として下水処理のほとんどは有機物除去を目的とした二次処理であり、平成15年度末において全国の高度処理人口普及率は12.2%と依然として低く¹⁾、全国政令指定都市を例にとっても下水処理場の放流水の平均水質はBOD $8.1\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 、全窒素 $16.5\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 、全リン $1.04\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ と高く、環境基準を達成するどころか、放流先の水環境の悪化がますます懸念される²⁾。これは高度処理が二次処理に比べ建設費や運転コストが高いことや、運転・管理が困難になることが原因と考えられる。そのため高度処理の普及にはその地域にあった低コストで維持管理が容易な技術の開発が求められる。

一方、近年では生態系の機能を強化し、破壊した生態系を修復し、生態系の機能を利用する生態工学的な手法を用いた環境保全修復技術は、人間と自然との共存を可能にし、持続可能かつ環境にやさしい技術として注目されつつある^{3, 4)}。生態工学を活用した自然浄化機能の強化においては、水生植物が重要な役割を担っており、その中、人工ヨシ湿地は、高い水質浄化能力を有していること、多種多様な生物種のすみかとなることや低コスト、維持管理が容易であることから、近年では創出方法の確立や水質浄化システムの実用化が期待されている。

既往の研究においては、人工ヨシ湿地の浄化機能として表面流れFWS (Free Water Surface Flow) 方式では主にヨシ湿地の整流効果による浮遊性懸濁物質 (SS) の沈降・堆積、ヨシ湿地に生息している微生物による摂取・分解、浸透流れ方式SF (Sub-surface Flow) 方式ではヨシの吸収、ヨシによる地下部への酸素供給能力および根茎付近 (根圏) での微生物活性、土壤媒体によるろ過・吸着が水質浄化に起因しているという報告がある⁵⁻⁷⁾。また、排水を植栽基盤に流入させる浸透流れ方式の栄養塩除去能力が高いことが明らかになっているが、一般の土壤を植栽基盤とした場合は透水性が悪く、目詰まりが生じて処理水量が小さくなり、栄養塩除去が十分に発揮できないことも指摘されている⁸⁾。

本研究では、このような高い栄養塩除去能力を有するヨシを下水高度処理システムとして実用化させるために、

人工ヨシ湿地を創出するための基礎である植栽基盤に着目し、空隙率の異なる植栽基盤のヨシの生育に及ぼす影響、空隙率すなわち透水性向上による処理水量の確保、また栄養塩除去特性に及ぼす影響、さらに実用化を図るための最適な水面積負荷条件について検討を行った。

2. 実験方法

2.1 実験装置及び概要

パイロットスケールの人工ヨシ湿地の実験装置の概略図をFig. 1に示す。装置は幅0.8m、長さ1.2m、高さ0.8mの水槽で、長さ1.1mの仕切り板によって中央で区切られている。流入した下水処理場の二次処理水は、まず水槽の前端に入り、仕切り板と槽枠の間を通過して180度反転、後部を流れて槽外へ流出する。二次処理水は宮城県内の下水処理場から引き、水槽上部から流入して下部から流出させる浸透流れ方式により実験を行った。これらの水槽に植栽基盤として自然の状態ではヨシが生育する砂および空隙率の高い礫、さらに非常に高い空隙率が確保できる人工の基盤材料である網状担体の3種類の基盤材料を0.7mまで充填した。網状担体は(株)新光ナイロンの接触酸化水処理用ヘチマロン (ポリプロピレン製) を用いた。空隙率はそれぞれ砂30%、礫45%、網状担体99%であり、粒径は砂1mm、礫10mmである。

ヨシの植栽基盤に関する実験は、水槽を砂系 (砂+ヨシ) および礫系 (礫+ヨシ) は2つ、網状担体系は4つを直列に連結して1つの水路とみなした装置で行った。ヨシは宮城県七北田川の土手に生育したものを水槽に植栽し、1年以上経過したものを用いた。

Fig. 1 Schematic diagram of the constructed reed bed used in the pilot plant experiment.

人工ヨシ湿地を用いた下水処理水の栄養塩除去特性に関する実験は、砂系（砂+ヨシ）および礫系（礫+ヨシ）については、水槽を2つ直列に連結したものを、砂のみ系（ヨシを植栽しない）については、水槽1つを実験装置とした。ヨシは水槽に植栽して2年以上経過したものをを用いた。

2. 2 実験条件

1) ヨシの植栽基盤の選定及び評価

実験装置に流入する下水二次処理水は、処理場内で活性汚泥処理を行った後、塩素消毒されて放流されたものである。水質についてTable 1に示す。全窒素（T-N）で15~20mg・l⁻¹、全リン（T-P）で1.0~3.0mg・l⁻¹と高濃度に残存している。

下水二次処理水の流入は1998年5月下旬からはじめ、同年12月上旬まで行った。流量は水槽から処理水が溢れ出さない範囲でできるだけ大きくなるように設定した。砂系0.3l・min⁻¹、礫系0.8l・min⁻¹、網状担体系1.6l・min⁻¹とし、水面積負荷はそれぞれ砂系0.23m³・m⁻²・day⁻¹、礫系および網状担体系は0.60m³・m⁻²・day⁻¹となった。

2) 人工ヨシ湿地による下水処理水の栄養塩除去特性

実験装置に流入させた下水二次処理水の性状はTable 1と同様である。水面積負荷については各系の基盤透水性の違いにより最大負荷条件が異なるため、8月においては砂系が0.15、0.23、0.38m³・m⁻²・day⁻¹の3段階、礫系が0.15、0.23、0.38、0.60、0.75m³・m⁻²・day⁻¹の5段階、砂のみの対照系が0.15、0.23、0.38、0.60m³・m⁻²・day⁻¹の4段階、12月においては3系ともに0.15、0.23、0.38、0.45m³・m⁻²・day⁻¹の4段階と段階的に水面積負荷を変動させた。

2. 3 サンプルング及び分析方法

植栽基盤に関する実験では、採水は月に1回行い、採水地点は流入原水および連結した各水槽の槽内および流出口とした。試料は直ちに0.45μmメンブレンフィルターでろ過した後、分析に供した。ヨシについては生育状態を把握するために月1回水槽毎に本数を測定し、さらにランダムに20本を選択して高さを測定し平均値を算出した。また、ヨシの根圏に生息する細菌を調べるため、ヨシの根の一部を採取し、滅菌水で十分に洗浄した後、測定に供した。測定項目は従属栄養細菌、アンモニア酸化細菌、亜硝酸酸化細菌で、従属栄養細菌は桜井培地、アンモニア酸化細菌と亜硝酸酸化細菌は下水試験法⁹⁾に

Table 1 Water quality of the influent

pH	6.5 ~ 7.0
SS (mg・l ⁻¹)	1.0 ~ 2.0
TOC (mg・l ⁻¹)	4.8 ~ 6.5
T-N (mg・l ⁻¹)	15 ~ 20
NH ₄ -N (mg・l ⁻¹)	10 ~ 15
T-P (mg・l ⁻¹)	1.0 ~ 3.0
Residual chlorine (mg・l ⁻¹)	< 0.05

基づく培地で培養し、MPN法で計数した。

人工ヨシ湿地を用いた下水処理水の栄養塩除去特性に関する実験について、採水は、水面積負荷を変動させる毎に馴置期間として1週間以上経過してから行った。採水地点は流入箇所から流下方向に0、120、240、360、480cmの地点で、水深5cmの部分で行った。さらに0、240、480cmの地点では、基盤深さ0、30、60cmにおける土壤間隙水をボーラスカップにより採水した。

測定項目は溶存態全有機炭素（DOC）、溶存態全窒素（DTN）、アンモニア態窒素（NH₄-N）、亜硝酸態窒素（NO₂-N）、硝酸態窒素（NO₃-N）、溶存態全リン（DTP）、リン酸態リン（PO₄-P）である。DOCは島津社製のTOC-5000を用いて分析した。DTNおよびDTPは下水試験法⁹⁾に基づきペルオキシ二硫酸カリウムと水酸化ナトリウムによるアルカリ性過硫酸加圧、加熱分解後テクニコン社のオートアナライザーⅡを用いて分析した。NH₄-Nはインドフェノール法、NO₂-NおよびNO₃-NはCd-Cu還元法、PO₄-Pはモリブデン青法により、ブランルーベ社のトラックス800を用いて分析した。

3. 実験結果及び考察

3. 1 ヨシの植栽基盤の選定及び評価

1) ヨシの生育状況による各植栽基盤の評価

砂、礫および網状担体を植栽基盤とした各系のヨシの生育密度の経時変化をFig. 2に、平均高さの経時変化をFig. 3に示す。生育密度の最大値については砂系452本・m⁻²、礫系658本・m⁻²、網状担体系507本・m⁻²であった。ヨシが枯れはじめると9月以降には台風の影響もあり生育密度は減少したが、網状担体系における減少は砂系および礫系に比べて急激なものであった。また、平均高さについても、砂系：約2m、礫系：約1.8mに比べ、網状担体系：約1.0mと低く推移しており、網状担体系ではヨシの本数が多いものの個体の生育が悪い結果となった。

この原因として、植栽基盤として用いた網状担体がヨシの安定性に影響を与えていたことが考えられる。既往の研究では、網状担体は空隙率が99%以上と高いため、ヨシの生長にともなう分けつに適しており、生長期における本数の増加速度が砂や礫に比べて大きいことが示されているが¹⁰⁾、本実験でも同様な結果が得られた。しかし、9月以降に生じるヨシ枯死に加えて、台風などの外的要因による生育密度の減少が網状担体系できわめて大きかったことや平均高さは砂系と礫系の約半分しかなく生育が不良であったことから、網状担体がヨシの植栽基盤として十分に役割を果たせず、生育にも影響を与えたと考えられる。

2) 窒素及びリンの除去特性による各植栽基盤の評価

各系におけるDTN除去率の推移をFig. 4に示す。砂系

Fig. 2 Variation of density of the reed in different packed media.
Bars: ■, sand; ▨, gravel; □, net material.

Fig. 3 Variation of height of the reed in different packed media.
Bars: ■, sand; ▨, gravel; □, net material.

が80～ほぼ100%と高い値で推移しているが、これは水面積負荷が低く設定されているため、滞留時間が他の系に比べて長いことが影響していると考えられる。礫系はヨシの平均高さが最大となる9月に最も高い値を示し、枯死が始まる9月以降は一定の値で推移している。網状担体系は最も低い値で推移しており、12月には負の値を示し溶出に転じている。滞留時間を考慮し、DTN除去速度を算出した結果をFig. 5に示す。砂系は年間を通して $2.35 \sim 3.57 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ の範囲で比較的安定しており、礫系は除去率と同様に9月の $6.07 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ をピークとして以降安定した値を示している。それに対して網状担体系は9月に $2.65 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ とピークを迎えるものの値は他の系より小さく、12月には溶出に転じて $-1.96 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ となった。

冬季において窒素除去速度が低下する理由としてはヨ

Fig. 4 Variation of DTN removal efficiency in different packed media.
Bars: ■, sand; ▨, gravel; □, net material.
Retention time: 3.1 day, sand; 1.2 day, gravel and net material.

Fig. 5 Variation of DTN removal rate in different packed media.
Bars: ■, sand; ▨, gravel; □, net material.

シの枯死による吸収量の低下、水温の低下による根圏に生息する細菌による硝化・脱窒素作用の減少などが考えられる。特に網状担体系では9月以降本数の減少が激しかったため、ヨシの枯死による吸収量の低下は他の系に比べ影響が大きかったものと考えられる。

各系の窒素の除去能力を比較するため、年間の平均除去率と平均除去速度を算出すると、除去率は砂系89.7%、礫系23.1%、網状担体系6.7%、除去速度は砂系 $2.79\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 、礫系 $2.26\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 、網状担体系 $0.47\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ となり、窒素の除去能力については砂系>礫系>網状担体系という結果となった。砂系および礫系における窒素の除去速度は既往の研究で得られた値を上回るもので、網状担体系の除去速度も既往の研究で示された値の範囲内であった^{8, 10-13)}。

また、単位重量あたりの根における従属栄養細菌数、アンモニア酸化細菌および亜硝酸酸化細菌密度を測定した結果をTable 2に示す。従属栄養細菌数およびアンモニア酸化細菌において砂系と礫系は網状担体系より密度がやや高いことがわかった。また、ヨシの根系構造に関する研究では、基盤材料の粒径が小さいほど根の量が増加し、さらに分枝の程度が大きく、比表面積の大きな根が形成されることが報告されている¹⁴⁾。これらのことを考えると本実験において砂系および礫系は、空隙率の高い網状担体に比べ、比表面積の大きな根系が多く成長することにより根系全体の細菌量の増加、および根の比表面積の増大に伴う酸素供給促進による細菌の活性化、さらに植物の吸収能が向上した結果、高い除去能が得られたと考えられる。

リンについては、各系のDTP除去速度の推移をFig. 6に示す。各系とも大きく変動し、特に枯死が始まる9月からは、溶出が多くみられた。リンの除去能を簡単に比較するため、年間の平均除去率と平均除去速度を算出すると、除去率は砂系26.5%、礫系-14.2%、網状担体系-8.6%、除去速度は砂系 $0.10\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 、礫系 $-0.05\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 、網状担体系 $-0.01\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ となり、砂系>網状担体系>礫系という結果となった。比表面積の大きな砂によるリンの吸着能が高いことが反映された結果と考えられる¹⁰⁾。

3. 2 人工ヨシ湿地を用いた下水処理水の栄養塩除去特性

1) 水面積負荷条件の栄養塩除去に及ぼす影響

次に植栽基盤材料に関する検討結果から、ヨシ湿地の創出に適する砂および礫を植栽の基盤材料として用い、

Table 2 Changes in the bacteria density in each packed media

	heterotrophic bacteria	nitrite bacteria	nitrate bacteria
sand	1.6×10^8	1.1×10^6	4.5×10^5
gravel	2.4×10^8	3.4×10^6	6.2×10^5
net material	8.3×10^7	1.1×10^5	5.2×10^5

Unit : MPN/g-dry root

Fig. 6 Variation of DTP removal rate in different packed media.

Bars: ■, sand; ▨, gravel; □, net material.

人工ヨシ湿地浄化システムを作製し、栄養塩除去について検討を行った。水面積負荷の影響については、Fig. 7に8月の各水面積負荷におけるDTNの除去率の変化を、Fig. 8に除去速度の変化を示す。除去率については、砂系では本実験装置における水面積負荷の限界値である $0.38\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ まで90%以上と安定した除去率が得られた。礫系では水面積負荷 $0.23\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ で92.6%と最大値となり、 $0.60\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ まで70%以上の高い除去率が維持され、最大水面積負荷の $7.5\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ の場合では、55.8%までに減少した。水面積負荷の増加に伴う滞留時間の減少は除去率を低下させたが、砂系は限界水面積負荷、礫系は一定の水面積負荷までにその影響が少ないことがわかった。それに対して、ヨシを植栽していない砂のみ系では水面積負荷にかかわらず除去率は20~40%でばらついた値を示した。

除去速度については、砂系では限界まで水面積負荷が増加するにともない除去速度も増加した。これは砂系の除去率が水量負荷を変化してもほぼ一定の高い値を維持したためであると考えられる。一方、礫系では、水面積負荷が $0.60\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ までに除去速度が増加し、その後は維持されるか、やや減少傾向にあった。礫系において水量が最大で400%増加しているのに対して除去率の低

Fig. 7 Changes in DTN removal efficiency with different water surface loading rate (Aug.). Symbols: ■, sand + reed; ●, gravel + reed; ▲, sand.

Fig. 8 Changes in DTN removal rate with different water surface loading rate (Aug.). Symbols: ■, sand + reed; ●, gravel + reed; ▲, sand.

下は約40%にとどまっていたため、水面積負荷の増加にともない除去速度も増加する結果になったものと考えられる。砂のみ系については、除去率と同様にばらついた値を示した。

本実験の結果から窒素除去に関しては、砂系においては水面負荷を高く設定した場合、90%以上の高い除去率が得られ、除去速度も最大になったことから最適な水面積負荷はその限界値 $0.38 \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ であると考えられる。一方、礫系に関しては水面積負荷を $0.60 \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ に設定した場合に最大除去速度を示し、除去率も70%以上と高く維持され、処理水質も $5 \text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下と良好であった。

リンについては、8月の各水面積負荷におけるDTP除去率の変化をFig. 9に、除去速度の変化をFig. 10に示す。砂のみ系では、各負荷条件ともにDTPの除去率が90%以

Fig. 9 Changes in DTP removal efficiency with different water surface loading rate (Aug.). Symbols: ■, sand + reed; ●, gravel + reed; ▲, sand.

Fig. 10 Changes in DTP removal rate with different water surface loading rate (Aug.). Symbols: ■, sand + reed; ●, gravel + reed; ▲, sand.

上で高い除去率が示したが、砂系では $0.23 \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ 以下の場合、除去率は $-20.8 \sim 18.1\%$ と低く、一部で溶出がみられ、 $0.38 \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ で 50.0% と高くなった。礫系では水面積負荷が $0.15 \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ の場合に -286% 以下を示し、リンの溶出が顕著であった。その後、水面積負荷の増大に伴い、除去率が高くなり、最大水面積負荷 $0.75 \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ において、最大の 97.1% となった。除去速度については、砂系および礫系のリンの除去速度は $0.23 \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ 以下の低負荷条件において負の値を示し、その後、除去率と同様に水面積負荷の増加に伴い増加する傾向がみられた。

砂のみ系ではリンの除去能が高く、ヨシを植栽した砂系および礫系では、低負荷条件においてリンが除去されなく、逆に水質が悪化した。Fig. 11に礫系の槽内の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度変化を示す。図に示すように流下方向に従い、

$0.38\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 以上の高負荷条件では $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度が段階的に減少したのに対し、低負荷条件では120cmの地点から濃度の上昇がみられ、特に240cmを過ぎた2槽目ではその上昇が顕著であった（砂系も同様な傾向）。これはヨシ湿地のリンの除去機構に起因すると考えられる。砂のみ系では、リンの除去機構は砂への物理的な吸着作用が主と考えられるが、砂系および礫系では、基盤への吸着やヨシの吸収作用によるリンの除去が見込まれる一方で、同時に枯死や根腐れによる溶出も生じる。低負荷条件では、滞留時間が長いため有機物の分解が進行し、水路の後部でリンの水中への回帰が卓越した結果、水質が悪化したと考えられる。また、礫系でその傾向が砂系より顕著に現れたのは、砂のリンの吸着能が高いことによるものと考えられる。特に長期にわたって運転したヨシ湿地においては、基盤のリン吸着能の飽和や流入およびヨシの枯死や根腐れによる有機物の蓄積など、リンの水中回帰量の増加が進行すると考えられる。これらの結果より、リンの除去を考慮した設計や長期運転管理を行う場合、水面積負荷を比較的高く設定した方が良好な除去が期待できると考えられる。

2) 植栽基盤及び季節の変化の栄養塩除去に及ぼす影響

2種類の植栽の基盤材料に砂および礫を用いた人工ヨシ湿地、対照系の砂のみ系においてはFig. 8およびFig. 10に示すように植栽基盤の違いにより、窒素およびリンの除去速度に顕著な差がみられた。窒素については、8月における最大DTN除去速度では、砂系 $5.49\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 、礫系 $6.61\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 、砂のみ系 $2.78\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ であり、礫系>砂系>砂のみ系の順となった。一方、最大DTP除

去速度では、砂系 $0.51\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 、礫系 $2.04\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 、砂のみ系 $1.05\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ であり、礫系>砂のみ系>砂系の順となった。礫系はDTN、DTPともに高い除去能を有することがわかった。これはヨシ湿地を創出する際、礫系では高い透水性を有するために水面積負荷を高く設定するができ、さらに高水面積負荷条件でも比較的高い除去率が維持出来たことによるものと考えられる。大量の水を高効率に処理する場合には礫系の人工ヨシ湿地が有効であることを示した。

一方、12月の最大DTN除去速度は砂系 $4.00\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 、礫系 $2.74\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 、砂のみ系 $2.27\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ となり、砂系>礫系>砂のみ系となった。また、最大DTP除去速度は砂系 $0.13\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 、礫系 $0.10\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 、砂のみ系 $1.05\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ となり、砂のみ系>砂系>礫系であった。なお、8月と12月では水面積負荷が異なるため最大除去速度の単純な比較は出来ないが、補間して同水面積負荷における除去速度としてその傾向を比較すると冬季の方で大きく低下した。これは8月に比べ、砂のみ系では吸着が主な栄養塩除去機構であるため、除去速度が維持されたが、砂系および礫系では水温、気温が低いためにヨシの栄養塩吸収能や根圏における硝化・脱窒素能が低下したこと、さらに冬季における枯死したヨシの溶出などが原因により除去速度が大きく低下した。しかし、砂系は礫系に比べ、同じ負荷条件においてDTNの除去速度の低下が小さく、12月においても一定の窒素除去能が有することがわかった。

処理水質については、各基盤材料の人工ヨシ湿地の8月における流入水および処理水DTN濃度をFig. 12に示す。流入水のDTN濃度は $15.0\sim 20.0\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ の範囲で推移して

Fig. 11 Changes in $\text{PO}_4\text{-P}$ concentration along reed bed with different water surface loading rate (gravel). Symbols: ■, 0.15; ▲, 0.23; ●, 0.38; ○, 0.60; □, 0.75 ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$).

Fig. 12 Changes in DTN concentration of influent or effluent in each constructed reed bed (Aug.). Symbols: □, influent; ■, effluent of sand + reed system; ●, effluent of gravel + reed system.

いた。このような流入濃度範囲内において砂系の流出水は $1.0\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 前後と安定した処理水質が得られた。これに対して礫系では、砂系に比べて処理水のDTN濃度が高いことがわかる。このように砂系では、高い処理水質が得られることが明らかとなった。

8月の人工ヨシ湿地実験装置内部の窒素の形態および濃度の挙動について、砂系をFig.13に、礫系をFig.14に示す。砂系においては $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の減少と同時にDTNや $\text{NO}_x\text{-N}$ ($\text{NO}_3\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N}$)も減少しており、速やかに硝化・脱窒素が起きたと推察される。また、硝化・脱窒素反応は実験装置の流下距離のほぼ半分の240cm地点で終了しており、装置を二つに分割することで処理水量が2倍に確保できる可能性が示された。礫系では、装置の前段で $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の減少に伴い $\text{NO}_x\text{-N}$ の増加がみられ、まず硝化が進行した。その後、装置の後段240cm以後の地点から $\text{NO}_x\text{-N}$ およびDTNの減少がみられ、脱窒素が生じたと考えられる。12月にも同様な傾向がみられた。

このような窒素の動態について、8月の砂系、礫系および砂のみ系の流下距離240cm地点における基盤深さ0、30、60cmの間隙水中のDOCの変化をFig.15に示す。礫系では深さ方向にはほとんど変化がみられなかったのに対して、砂系では深さ方向にDOCが増加しており、有機物の蓄積が示唆されている(12月も同様な傾向)。有機物の供給源としては、装置内部が嫌気状態になることで腐敗した根などの植物体があるが、空隙率がより小さい砂の方で発生する有機物量も多くなることがわかった。実際に装置からヨシを引き抜き、内部を観察したところ、砂系では硫化水素臭がし、ヨシの根の先端部分にも腐敗がみられた。砂系では脱窒素に十分な有機物の蓄積があったため、脱窒素が進行し、12月においても良好な除去率と処理水質が得られたと考えられる。

このように粒径の小さい砂系では、脱窒素に不可欠な有機物が供給されたことや比較的嫌気的な環境を形成できること、さらに前節に述べたように砂系のヨシの根系構造が植物の吸収や細菌の活性化に有利であることから硝化・脱窒素の進行と植物の栄養塩吸収の増加、それに加え、高い $\text{NH}_4\text{-N}$ 吸着能¹³⁾を有するためにより高い処理水質が得られたと考えられる。

したがって、栄養塩の除去に着目した場合、礫系は処理水量が多く確保でき夏季においては水面積負荷を制御することで除去量を多く確保できる利点を有する。一方、冬季においては処理水量を確保しようとすると大幅な除去率の低下と水質の悪化などの問題が生じる。それに対して砂系は処理水量が少ないものの冬季においても高い

Fig. 13 Changes in DTN, $\text{NO}_x\text{-N}$ and $\text{NH}_4\text{-N}$ concentration in constructed reed bed packed with sand (Aug.). Symbols: $\square$, DTN; $\blacktriangle$, $\text{NH}_4\text{-N}$; $\bullet$, $\text{NO}_x\text{-N}$.

Fig. 14 Changes in DTN, $\text{NO}_x\text{-N}$ and $\text{NH}_4\text{-N}$ concentration in constructed reed bed packed with gravel (Aug.). Symbols: $\square$, DTN; $\blacktriangle$, $\text{NH}_4\text{-N}$; $\bullet$, $\text{NO}_x\text{-N}$.

Fig. 15 Variation of DOC concentration in constructed reed bed (Aug.). Sample was collected at a point where the distance from the inlet was 240cm. Bars: $\blacksquare$, 0cm; $\square$, 30cm; $\square$, 60cm.

処理水質が得られることから、冬季に良好な水質結果が要求される場合の植栽基盤として適していると考えられる。

4. まとめ

本研究では、下水の高度処理技術として人工ヨシ湿地を創出するための植栽基盤、栄養塩除去能力および最適な水面積負荷条件について検討を行い、以下のような結果が得られた。

- 1) 空隙率の異なる砂、礫および網状担体をヨシの植栽基盤として用いた場合、網状担体では、ヨシの安定性などに問題が生じ、ヨシの生育は不良であるが、砂および礫ではヨシの生育状況が良好であり、植栽に適することがわかった。年平均DTN除去速度は砂系 $2.79\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 、礫系 $2.26\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 、網状担体系 $0.47\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ であり、砂系で最も高い除去速度を有することがわかった。
- 2) 水面積負荷と栄養塩除去能力の関係について検討したところ、砂系で限界の水面積負荷である $0.38\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ においてDTN除去速度 $5.5\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 、DTP除去速度 $0.5\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ と最大になった。礫系では水面積負荷 $0.60\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ においてDTN除去速度 $6.6\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 、DTP除去速度 $1.1\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ が得られ、良好な処理水質が維持したことがわかった。
- 3) ヨシの生育に適する2種の植栽基盤である砂および礫を用いた人工ヨシ湿地の栄養塩除去特性および季節変化の影響を検討した結果、砂系では、空隙率が小さいため有機物の供給や嫌気条件の適正化により脱窒素が進行した結果、高い処理水質が得られた。一方、礫系では高い透水性を有するために水面積負荷を高く設定するができ、さらに高水面積負荷条件でも除去速度が高く、大量の水を効率的に処理する場合には礫系の人工ヨシ湿地が有効であることがわかった。すなわち処理目標に応じた植栽基盤の選定が重要であることが示唆された。季節の影響については、冬季では、窒素およびリンの除去能の減少がみられたが、砂系は礫系に比べ、その影響が小さいことがわかった。

参考文献

- 1) 国土交通省下水道部：平成15年度末の高度処理人口普及率について、<http://www.mlit.go.jp/> (2004)
- 2) 日本石鹸洗剤工業会：環境年報 全国政令指定都市の下水処理場における水質の現況、22、31-34 (1997)
- 3) 須藤隆一：水域の直接浄化の意義と展望、用水と排水、32 (8)、663-667 (1990)
- 4) 須藤隆一編：環境修復のための生態工学、講談社サイエンティフィク、229pp.、東京 (2000)
- 5) 細見正明：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 (1994)
- 6) S. C. Reed, R. W. Crites, and E. J. Middlebrooks: Natural Systems for Waste Management and Treatment, McGraw-Hill, Inc Second Edition, 173-286, New York (1995)
- 7) R. H. Kadlec: Overview-Surface Flow Constructed Wetlands, Proceedings of 4th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, 1-12 (1994)
- 8) 細見正明：ヨシ人工湿地における水質浄化法、用水と廃水、36 (1)、40-43 (1994)
- 9) 日本下水道協会：下水試験方法、807pp.、東京 (1997)
- 10) 加藤智博・徐 開欽・千葉信男・榎内孝信・細見正明・須藤隆一：浚渫ヘドロ上におけるヨシ原の創出手法の開発とその評価、土木学会論文集、7 (594)、1-10 (1998)
- 11) 田畑真佐子・加藤聡子・川村 晶・鈴木潤三・鈴木静夫：ヨシ植栽水路における河川水中の窒素・リンの除去効果、水環境学会誌、19 (4)、83-89 (1996)
- 12) R. Perfler and R. Haberl: Actual Experience with the Use of Reed Bed System for Wastewater Treatment in Single Households, Wat. Sci. Tech., 28(10), 141-148 (1993)
- 13) C. Platzer and R. Netter: Factors Affecting Nitrogen Removal in Horizontal Flow Reed Beds, Wat. Sci. Tech., 29 (4), 319-324 (1994)
- 14) 荒川裕利・山田一裕・千葉信男・西村 修：植栽基盤の粒径がヨシの根系構造および機能に及ぼす影響、土木学会平成14年度東北支部技術研究発表会講演概要、806-807 (2003)

(受付 2005. 2. 14)

(受理 2005. 4. 28)