

植生地盤水路を用いた水質浄化法に関する研究

山本 縁 寺井 学

宮岡 修二

(本社土木技術本部環境技術第二部)

A Study on Purification Capacity of Vegetation Covered Ground

Yukari Yamamoto Manabu Terai

Shuji Miyaoka

Abstract

The capacity of wetland to purify water was investigated by passing lake water through vegetation blocks. Various kinds of channels of free water surface flow and subsurface flow were constructed in ground sections covered by plants, and their purification performances were compared. The investigation showed that 1) subsurface flow channels removed suspended matter more effectively than free water surface flow channels throughout the year, 2) channels in which reeds were planted removed more nitrogen and phosphorus than channels with no reeds, especially in summer, 3) channels with charcoal installed showed effective removal all the year round, and the effluent contained less contaminants than that from the other channels, and 4) the channel that had both charcoal and reeds effectively purified water, and the purification rate was as high as 8 g/m²/d when the nitrogen load rate was 10 g/m²/d. The study showed that channels with high purification performance can be constructed in vegetation-covered ground by combining reeds and charcoal.

概要

湿地の浄化性能の把握を目的に植生地盤へ湖水を送水し性能評価を実施した。植生地盤としては表面流れ方式と浸透流れ方式の2種の水路を造成し、比較調査した。また、浄化能力の強化を目的に地盤材料を変えることによる浄化性能の向上についても確認した。その結果、1) 浸透流れ水路は表面流れ水路に比べ懸濁物質除去効果が高かった。この現象は一年を通じて見られた。2) 浸透流れの水路のうち、ヨシを植栽した水路は、ヨシを植栽していない水路に比べ窒素、リンの除去効果が高かった。特に夏場においてその効果は顕著であった。3) 地盤材に木炭を用いた植生地盤水路は冬場においても他の地盤水路と比べ流出水の窒素濃度が低く、一年を通じて窒素除去効果が高かった。4) 木炭とヨシを組み合わせた植生地盤水路は、窒素負荷量が10g/m²/dに対し浄化速度が8g/m²/dと速く、水質浄化効果が高かった。以上のことより、地盤にヨシと木炭を組み合わせることにより、浄化性能の高い植生地盤水路を造成できることがわかった。

1. はじめに

公共用水域等において窒素、とりわけ硝酸性窒素による水質汚染が近年問題となっている。平成11年に硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素が公共用水域及び地下水の水質汚濁に係わる環境基準に加えられ、硝酸性窒素の浄化が求められている。しかし、これらの窒素汚染水を低コストで浄化できる有効な技術が確立されていない。一方、水辺においては生物の生息環境の創出が求められている。そこで、これらのニーズを合わせ持つ技術として、湿地浄化法による浄化技術に着目した。

湿地浄化法は、ヨシなどの水生植物が生育した湿地に水を導入して浄化する方法である。その手法としては、表面に水を流して浄化する表面流れ方式と地盤内に水を浸透させて浄化する浸透流れ方式がある。これまでいくつかの実証実験^{2),3)}がなされているが、水面積負荷量が少ない事例や流入負荷量が少ない事例が多く、より浄化性能の高い工法が求められている。本研究では水質浄化機能の強化を図るため、地盤に木炭を使用するなど、浄化性能の高い植生地盤の開発を目的として、実際の湖水を用いた現地実験を行った。

2. 実験概要

2.1 実験施設

実験施設の全景をPhoto 1に示す。現地実験は2002年6月から2003年11月までの約1年半、某汽水湖の周辺陸地にて行った。実験に供試した水は、湖に流入している用水路からポンプによって取水した。実験施設の平面図をFig. 1に、実験ケースをTable 1に示す。実験施設は表面流れ方式を2水路、浸透流れ方式を4水路造成した。このうち、水路6は実験2年目の4月に新たに造成した実験区である。1水路の大きさは幅1m×延長10m×深さ0.6mとした。表面流れでは水深を10cm、浸透流れは浸透層の深さを55cmとした。処理水量は1水路あたり10m³/dayとし、1m³/m²/dayで各水路に送水した。植栽したヨシの草丈は約40cmの育成苗を、1水路に30株ずつ植栽した。

2.2 調査内容

2.2.1 水質調査 各植生地盤水路の浄化性能を把握するため、流入水と各水路流末水の水質調査を月1回ないし2回の頻度で実施した。流下方向の距離と浄化性能の関係性を把握するため、水路の途中地点を含めた採水調査を年2回実施した。分析項目は、水温、pH、電気伝導度(EC)、溶存酸素(DO)、酸化還元電位(ORP)、懸濁物質(SS)、有機炭素(TOC)、全窒素(TN)、溶存態全窒素(DTN)、化学的酸素要求量(COD_m)、硝酸態窒素(NO₃-N)、亜硝酸態窒素(NO₂-N)、アンモニア態窒素(NH₄-N)、全リン(TP)、溶存態全リン(DTP)、リン酸態リン(PO₄-P)とした。

2.2.2 ヨシ地上部の生育量調査 ヨシ地上部の生育量と水質浄化性能の関係性を明らかにするため、月1回ないし2回の頻度で写真撮影、草丈、茎数を調査した。ヨシ地上部による栄養塩類取込量の調査を年2回実施した。夏は各水路のヨシの一部を刈り取り、冬は全量を刈り取り、乾燥質量、窒素・リン含有量を測定した。

2.2.3 根圏、地盤調査 地盤材と根圏環境の関係性を調査するため、水路解体時に断面調査を実施した。また、物質収支を明らかにするため、ヨシ地下部の伸長量および地盤材への付着・堆積物量の調査を実施した。ヨシ地下部(地下茎、根)および地盤材を一部採取し、乾燥質量、窒素、リン含有量を分析した。

3. 水質浄化性能

3.1 各水路流出水の水質比較

流入水と各水路流末水のSS濃度の測定結果をFig. 2に示す。浸透流れの水路3～水路5の流末水は表面流れの水路に比べてSS濃度が低く、懸濁物の除去量が大きかった。

TNの流入水と各水路流末水の測定結果をFig. 3に示す。水路3(浸透：礫+ヨシ)と水路4(浸透：礫)の流末



Photo 1 施設全景
Vegetation Covered Ground

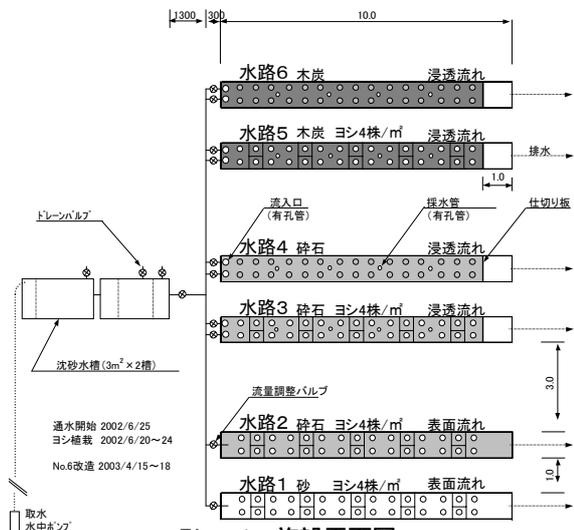


Fig. 1 施設平面図
Plane Figure

Table 1 実験ケース
Experiment Conditions

水路	通水方式	地盤材料	植物
1	表面流れ	砂	ヨシ
2	表面流れ 表面水深 10cm	礫	ヨシ
3	浸透流れ 浸透層の深さ 55cm	礫	ヨシ
4		礫	なし
5		木炭	ヨシ
6		木炭	なし

水を比べると、2002年9月以降ヨシを植栽した水路3の方が明らかにTN濃度が低い。この時期には、ヨシの草丈が160cmまでの高さとなり、生育が進んでいた。このことから、TNの浄化とヨシの生育に関係があると示唆される。2002年9月以降の調査結果から、各水路の水質浄化性能には以下に示す特長がみられた。水路3と水路2の流末水のTN濃度を比較すると、浸透流れ方式の水路3の方が低い。ヨシを植栽した浸透流れ水路の夏場と冬場の流末水を比較すると、夏場の流末水のTN濃度の方が総じ

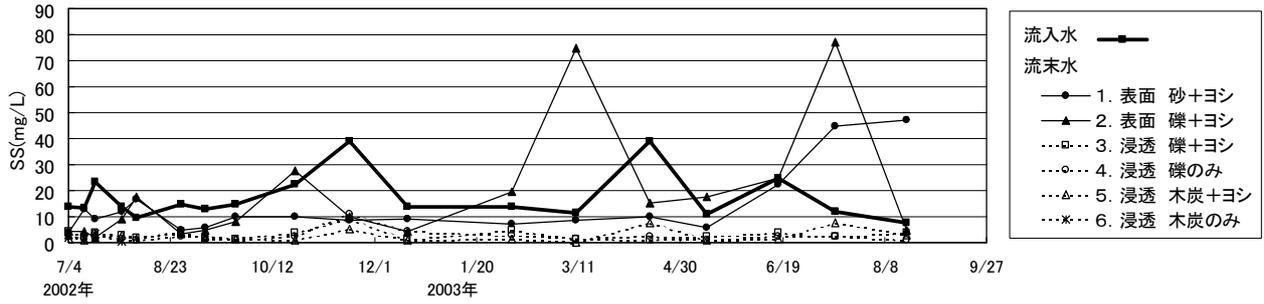


Fig. 2 SS濃度の測定結果

Measurement Result of Suspended Solids

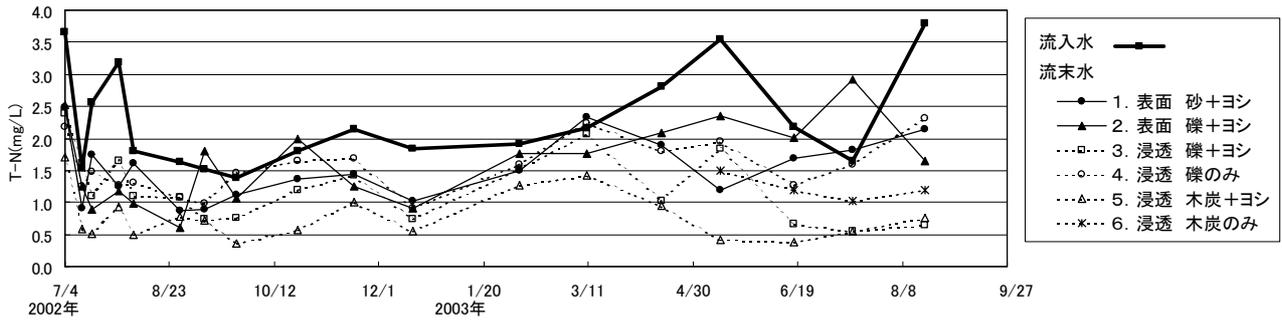


Fig. 3 TN濃度の測定結果

Measurement Result of Total Nitrogen

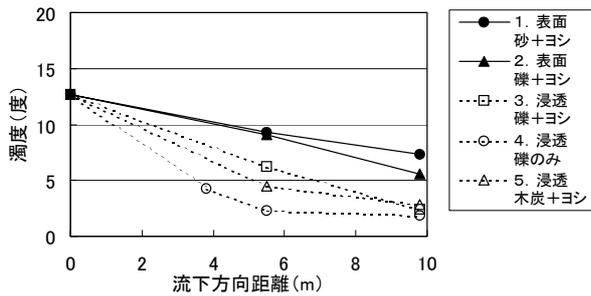


Fig. 4 流下に伴う濁度の濃度変化

Measurement Result of Turbidity

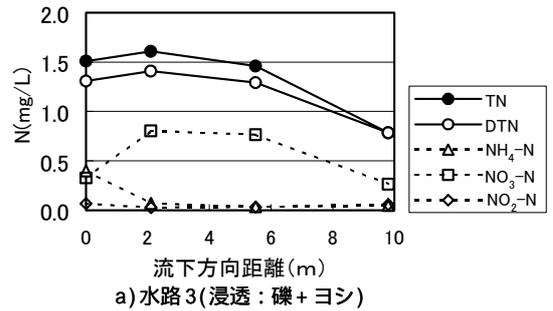
て低い。特に、地盤材に木炭を使用した水路5（浸透：木炭+ヨシ）の流末水のTN濃度は、実験した水路の中で最も低かった。

3.2 流下に伴う水質の変化

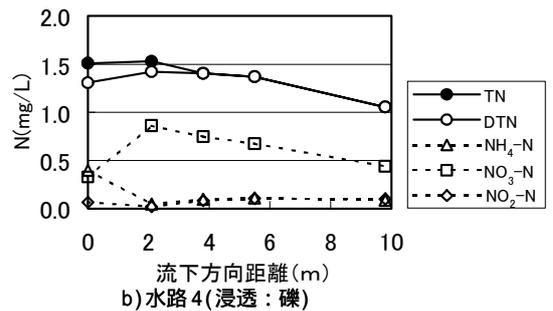
調査地点を流下方向に数箇所設定して、2002年9月に水質調査を実施した。

Fig. 4に濁度の調査結果を示す。濁度は、流入側から流末側に向けて徐々に減少した。特に、浸透流れ方式の水路3～水路5では濁度の低下が顕著であり、流入から5.5mまでの範囲での減少が大きい。

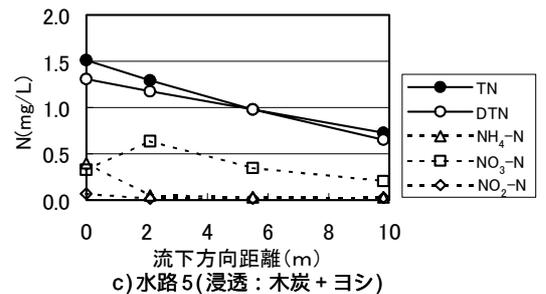
Fig. 5に水路3～5のTN, DTN, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, および $\text{NO}_2\text{-N}$ の分析結果を示す。各水路ともTN, およびDTN濃度は概ね流下とともに減少した。特に水路5では流入側から流末側にかけて一定の濃度の減少がみられた。 $\text{NH}_4\text{-N}$ は0～2mの範囲で、ほぼ全量が減少した。その一方、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は $\text{NH}_4\text{-N}$ の減少量と同程度ないし、それ以上の濃度増加が



a)水路3(浸透：礫+ヨシ)



b)水路4(浸透：礫)



c)水路5(浸透：木炭+ヨシ)

Fig. 5 流下に伴う窒素の濃度変化

Concentration of Nitrogen

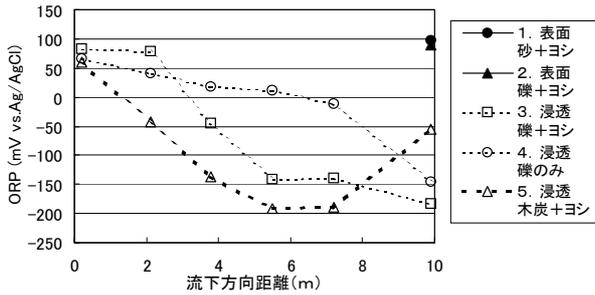


Fig. 6 流下に伴うORPの変化
Variation of Oxidation Reduction Potential

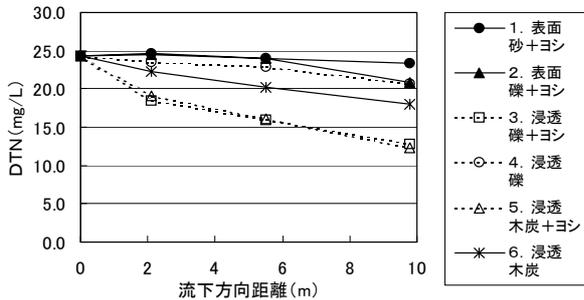


Fig. 8 流下に伴うDTNの濃度変化
Concentration of Dissolved Nitrogen

認められる。2m地点から流末側では $\text{NO}_3\text{-N}$ は減少したが、TN, DTNの減少量と $\text{NO}_3\text{-N}$ の減少量はほぼ同程度である。このことから、2m地点以降のTNの減少の大部分は $\text{NO}_3\text{-N}$ の減少であり、脱窒による浄化の可能性が示唆される。

Fig. 6に各水路のORPの測定結果を示す。ORPの測定は、脱窒が行われる環境条件が水路内に認められるかどうかを調査する目的で実施した。表面流れの水路1, 2のORPは表層水を測定し、浸透流れの水路3~水路5は観測孔の底部(水深50cm)で測定した。図に示すように、木炭を用いた水路5のORPが最も低い。2m地点で-40mVであり、水路前半からORPは低下していた。水路5の5.5m地点のORPは-190mV、ヨシを植栽した礫地盤の水路3のORPは-140mV、ヨシを植栽していない礫地盤の水路4は10mVであった。浸透流れ方式の水路はいずれも脱窒反応が起こりうる環境であったがその中でも水路5のORPは最も低く、脱窒反応にとって適した条件にあったといえる。水路内のORPは、実験開始当初から10月頃まで同程度の値で推移したが、水温の低下とともにORPはプラスの値に上昇した。

3.3 浄化性能の解析

Fig. 7に、2003年4月15日~11月19日に実施した調査結果を基にしたTN流入負荷量とTN浄化速度の関係を示す。表面流れの水路はTN流入負荷量に関係なくTN浄化速度がほぼ一定で、 $2.5\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$ 以下であった。これに対し、浸

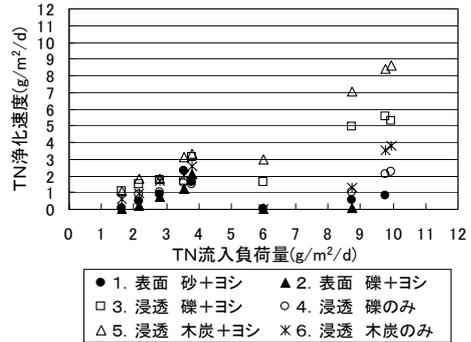


Fig. 7 TN流入負荷量と浄化速度の関係
Relation between the Amount of Nitrogen Loads, and Purification Rate

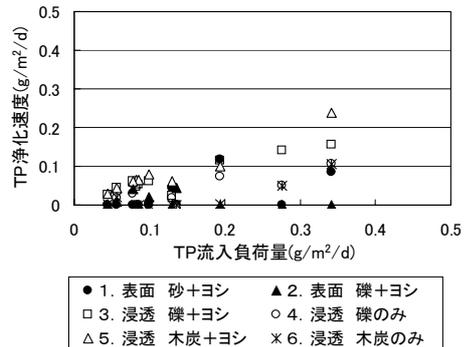


Fig. 9 TP流入負荷量と浄化速度の関係
Relation between the Amount of Phosphorus Loads, and Purification Rate

透流れ水路はTN流入負荷量とTN浄化速度に正の相関が認められた。TN負荷量が $10\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$ の高負荷でも水路5では除去率が80%、水路3では50%であった。TN浄化性能は高い順に、水路5(浸透:木炭+ヨシ) > 水路3(浸透:礫+ヨシ) > 水路6(浸透:木炭) > 水路4(浸透:礫)であった。表面流れよりも浸透流れの方が除去性能が高く、ヨシを植栽したほうが、地盤材は礫よりも木炭を使用した方が性能が高かった。Fig. 8はDTNが $25\text{mg}/\text{L}$ と高濃度の流入水を植生地盤水路に供給したときの流下に伴う水質変化を示す。先のFig. 5に示した流入水DTN濃度 $1.3\text{mg}/\text{L}$ の場合と同様、流下とともにDTNは減少している。特に、ヨシを植栽した浸透流れ方式の水路3と水路5は他の水路に比べDTN減少量が大きい。

Fig. 9にTPの流入負荷量と浄化速度の関係を示す。TNと同様、ヨシを植栽した浸透流れ水路の浄化性能が高かった。水路5のTPの除去率は50%であった。

4. ヨシの生育量

4.1 ヨシ生長量の変遷

ヨシの生育量調査のため、 $50\text{cm} \times 50\text{cm}$ 四方を1区画とし、水路ごとの流下方向に区画を設定し、草丈、茎数の計測を実施した。草丈は、区画ごとに最長草丈3本を選び、全長を計測した。Fig. 10に各水路の平均草丈の推

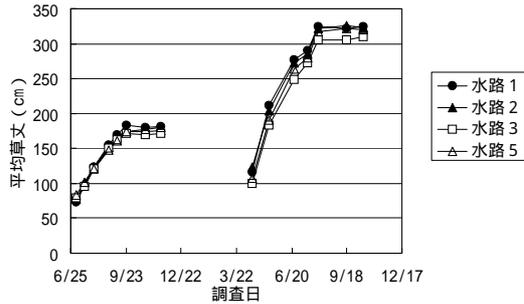


Fig. 10 ヨシの生長量測定結果
Monitoring of the Plant Growth



Photo 2 流下に伴う乾燥重量の測定結果(水路5)
Growth Situation of Plant

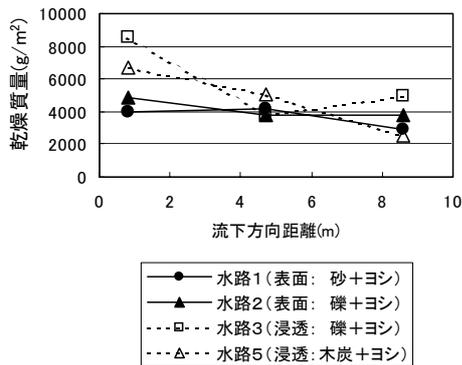


Fig. 11 流下に伴うヨシ1m²当たりの乾燥質量
Measurement Result of Dried Plant Weight

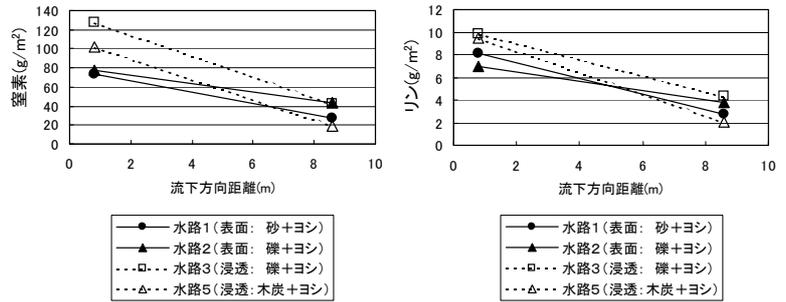


Fig. 12 流下に伴うヨシ1m²当たりの窒素、リン取込量
Measurement Result of Nitrogen and Phosphorus in Plant

移を示す。平均草丈に水路による差はみられなかった。植栽1年目と2年目では差があり、植栽1年目の草丈は1.8m、2年目は3.2mまで生長した。地下茎の発達等の要因で、2年目の方が生育が良かったものと考えられる。

4.2 ヨシ地上部の流下方向の生育量分布

水が水路を流下する過程でのヨシの生育状況について流下方向に6区画(50cm×50cm四方)を設定し、2003年7月に調査した。Fig. 11に各水路の地上部ヨシの1m²当たりの乾燥質量を示す。流入側に対し、流末側の乾燥質量が少ない。浸透流れの水路ではその傾向が顕著であった。Fig. 12に1m²当たりのヨシ地上部の窒素、リン現存量を示す。乾燥質量と同様、窒素、リンともに流入側に対し、流末側の現存量が少なかった。先の3.2節で示したように浸透流れ水路では、流下方向に窒素の減少が顕著であった。流下に伴い栄養塩の濃度が減少したことが、ヨシの生育に影響したと考えられる。Photo 2は、水路5を2003年11月19日に撮影したものである。流下に伴いヨシの生育量が減少していることが確認できる。

5. 水路の解体調査

5.1 調査概要

2003年11月20日～21日及び12月11日～12日に解体調査を行った。流下方向に6区画(50cm×50cm四方)を掘り起

こし、目視による地下断面調査を行った。また、地下茎、根および地盤材を採取し、ヨシ地下部の養分取り込み量と堆積物の蓄積量を調査した。

5.2 調査結果

5.2.1 ヨシ地下茎の調査結果 水路ごとの地下茎の断面調査結果を以下に示す。水路1(表面:砂+ヨシ)は太くしっかりした地下茎が50cm以深まで生長していた。水路2(表面:礫+ヨシ)は地下茎が上層に集中し、下層にほとんどなかった。地下茎が全体的に少なく、大部分が毛細根であった。水路3(浸透:礫+ヨシ)では水路2同様、地下茎、根とともに上層に集中してた。地下茎が少なく、毛細根が多く存在した。水路5(浸透:木炭+ヨシ)では水路1同様、太くしっかりした地下茎が50cm以深まで生長していた。

5.2.2 流下に伴う地盤材間隙堆積物の調査結果 現地断面調査では、礫地盤は流入側から流下2mまで堆積物が多く見られ、それ以降減少し、再び流末側に堆積物が見られた。水路からの排出において水が停滞したためと考えられる。木炭地盤は流下2mまで堆積物が多く見られたが、それ以降ほとんど堆積物が見られなかった。Fig. 13に地盤材1m²当たりに附着したSS量を示す。なお、図中の水路6は他の水路と実験期間が違うため期間中の流入負荷量をもとに換算した値を使用した。水路3(浸透:礫+ヨシ)は現地断面調査で観察されたように流

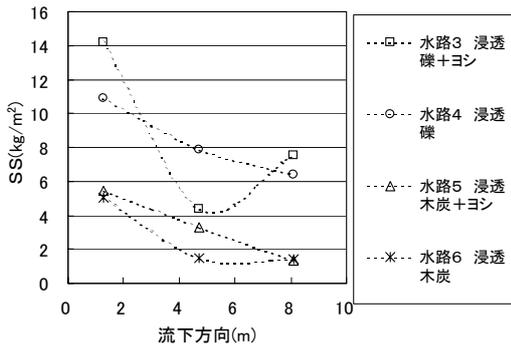


Fig. 13 流下に伴う地盤材1m²当たりのSS量
Measurement Result of Suspended Solids in
Ground

入側と流末側で堆積物が多かった。その他の水路は、流入側が多く、流末側が少ない傾向を示した。全水路のうち、地盤材に木炭を用いた水路5および水路6は堆積物量が少なかった。

6. 総合考察

Fig. 14は2002年6月25日～2003年11月19日までの全実験期間中に各水路に流入したTN負荷量と流出量、ヨシによる吸収量および水路捕捉量を表したグラフである。TN負荷量からTN流出量を差し引いたものが、TN浄化量である。白の部分は、TN浄化量からヨシによる吸収量、水路地盤の捕捉量を引いたものであり、何らかの要因により、水路から消失したと考えられる量である。グラフより、ヨシを植栽した浸透流れの水路3（浸透：礫+ヨシ）と水路5（浸透：木炭+ヨシ）は流出量が相対的に小さい。窒素流出量が最も少なかったのは、水路5であった。浸透流れ水路にヨシを植栽することで、効率的に水質浄化を行うことができることがわかった。

さらにFig. 14より、ヨシの地上部や地下部の取込量および地盤材や根圏への付着・堆積量は、TN浄化量のうち14.5～19%程度であった。3.2節で、浸透流れ水路は、脱窒反応が進む可能性のあるORP条件にあったことから、図中の白い部分は脱窒による効果を示すものと予想される。脱窒には有機物が必要であるが、実験期間中の流入水のCOD_{mn}は8mg/Lで、表面流れの流末水が8.4mg/L前後、浸透流れの流末水が6mg/L前後であった。浸透流れで脱窒が起こっていると考えた場合、減少したCOD_{mn}濃度が全て脱窒に利用されたとしても有機物量としては、COD_{mn}2mg/L × 12/32 = 0.75mg/Lである。この有機物全てが脱窒に使われるとし、理想的な脱窒反応として、CN比を1.5とした場合、脱窒可能な量はNとして、0.5mg/Lである。窒素減少量を水中の有機物を利用した脱窒として説明するには有機物量が少ない。脱窒が行われるには他に有機物の供給が必要と考える。その有機物起源を示唆する研究報告として、川西ら⁴⁾は植物根圏において植物、土壌からの有機物の供給が増大するなどにより、植生が

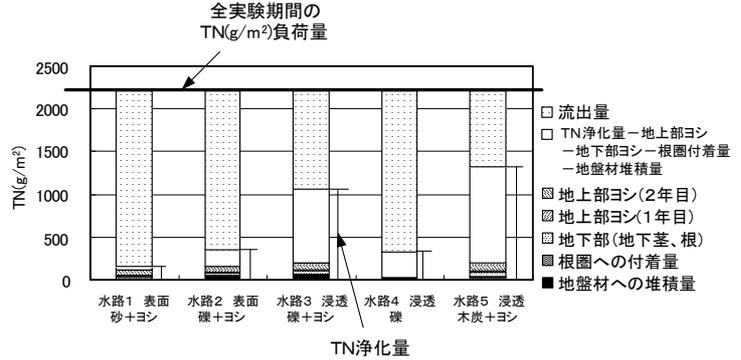


Fig. 14 植生地盤水路の物質収支
Substance Income and Outgo of Nitrogen

ある場合、硝酸性窒素除去が促進されると考察している。今回の実験でもヨシ植栽地盤水路で高い脱窒傾向が見られたことから、植物根圏環境より、有機物が供給され、脱窒が促進された可能性が考えられる。先に示したFig. 3のTNの調査結果より、冬場の2月、3月の流末水はTN濃度が高い。脱窒菌は高い水温依存性を持つと言われており、窒素の減少に脱窒が影響している可能性が水温からも推察される。

7. まとめ

植栽地盤水路実験より、表面流れ水路および浸透流れ水路の水質浄化性能を把握することができた。浸透流れ水路は表面流れ水路に比べ浄化性能が高い。浸透流れ方式では、ヨシが植栽されている水路の方が窒素除去性能が高く、浸透性地盤とヨシ植栽を組み合わせることにより高い浄化性能が得られることがわかった。さらに、地盤材料に木炭を用いることで、高い浄化性能を得られることがわかった。

謝辞

貴重なご意見、ご指導を頂いた岡山大学農学部後藤助教に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山本縁, 宮岡修二, 寺井学: 植生地盤を用いた水質浄化に関する現地実験, 土木学会年次学術講演概要集, pp.145-146, (2003)
- 2) 中村圭吾ら: 実大規模の浸透流方式湿地浄化法の開発とその評価, 土木学会論文集, No.678, -19, pp.81-92, (2001)
- 3) 細見正明: ヨシ人工湿地による水質浄化法, 水と廃水, Vol.36, No.1, pp.40-43, (1994)
- 4) 川西琢也ら: 休耕田土壌・植生ポットによる硝酸態窒素除去, システム農学, Vol.16, No.1, pp.79-82, (2000)