

ヨシ水路による河北潟水の浄化

小森 正樹, 中村 嘉利*, 沢田 博志*, 川村 満紀*

石川県保健環境センター (〒920-1154 石川県金沢市太陽ヶ丘1-11)

*金沢大学工学部 (〒920-8677 石川県金沢市小立野2-40)

[平成12年12月22日受理]

Purification of Kahokugata Lagoonal Water by Reed Bed System

Masaki KOMORI, Yoshitoshi NAKAMURA *, Hiroshi SAWADA * and Mitsunori KAWAMURA *

Ishikawa Prefectural Institute of Public Health and Environmental Science

(1-11 Taiyougaoka, Kanazawa, Ishikawa 920-1154)

* Faculty of Engineering, Kanazawa University

(2-40 Kodatsuno, Kanazawa, Ishikawa 920-8667)

[Received December 22, 2000]

Summary

The effect of reed bed system on the quality of Kahokugata lagoonal water was studied. The effects on water quality were examined by fractionation of dissolved organic carbon, nitrogen, and phosphorus using gel-chromatography. The suspended components of total nitrogen, total phosphorous, BOD, and COD were removed using reed bed system more efficiently than the soluble components of total nitrogen, total phosphorous, BOD, and COD. Based on UV220, UV260, TOC, T-N, and T-P, three major fractions were identified by gel-chromatography of Kahokugata lagoonal water. Among them, the 3rd fraction (the lowest molecular weight) decreased after passing through the reed bed, while the 1st one with the highest molecular weight increased. The relative ratio of hydrophilic component increased after the purification of Kahokugata lagoonal water using reed bed system; this suggests that the removal ratio of hydrophobic component was higher than that of hydrophilic component.

Key words: Dissolved organic nitrogen, fractionation, gel-chromatography, reed, Kahokugata

1. はじめに

湖沼や潟を含む停滞水域の水環境の汚染は、水中の生態系に対して著しい悪影響を与える。近年、停滞水域の水質浄化は重要な課題となっており、早急な対策が待たれる。現在用いられているBODやCODなどの汚染指標だけでは、環境水の保全と生態系に及ぼす影響を十分に把握できないと言われている^{1,2)}。湖沼などの閉鎖性水域では種々の窒素、リンなどによる富栄養化は深刻な環境

問題である。環境水に含まれる窒素、リンなどをヨシのような植物の浄化能の利用による処理の方法が近年注目されている³⁻⁵⁾。ヨシ植栽水路を用いた下水の窒素、リンの除去機構の解明、脱窒の寄与率の評価、生活雑排水の処理などの多数の研究が報告されている⁶⁻⁸⁾。

本研究では、ヨシ水路によって河北潟水中の汚染物質がどのように除去されるかを調べるために、有機物質ばかりでなく窒素およびリンなどを測定し、ヨシ水路による潟水の浄化能力について検討した。(1) BOD、窒素、

リンなどによる水質をそれぞれの検出方法にしたがって測定した。(2) ゲルクロマトグラフィーによるヨシ水路通過前後の濁水の分画を行い、汚染物質の分子量を推算した。(3) ゲルクロマトグラフィーに吸着樹脂を用いることによって有機質の疎水性と親水性の構成割合の量的検討を行った。

2. 調査方法

2. 1 調査方法

調査は石川県金沢市の河北潟に設置された人工のヨシ水路で平成11年6月10日から8月19日まで2週間毎に行った。対象の施設は休耕田に植栽してから3年経過した40m×40mのヨシ原(1m²当たり約100本)からなる延長1km、幅1.6m、深さ0.14mの水路であり、約220m³/日の河北潟水がポンプアップされているので滞留時間は約1日である。毎年、ヨシは十分成育すると刈り取られている。サンプリングはヨシ水路の入口と出口の2地点で、水その他ヨシを毎回5本採取した。

2. 2 測定方法

ゲルクロマトグラフィー分析は、前処理として検水150mlを1μmガラス繊維濾紙(TOP製GD-120)でろ過し、エバポレーターで温度38℃で析出物を出させない濃縮条件(濃縮倍数約10倍から15倍の範囲)で処理した。流入水の比較のため、濃縮倍数は同じになるようにした。この濃縮液10mlを、長さ1m内径2.16cmのガラス管に93cmの高さにセファデックスG15(Pharmacia Biotech Sephadex G15、あらかじめ蒸留水で十分に膨潤させた)を充填したカラムに添加して、自然流下の方法で超純水装置Milli-Q(日本ミリポア製)で製造した超純水を展開溶媒として分画した。フラクションコレクターにて5.6mlづつ分取し、フラクション毎に全有機炭素TOC、紫外領域の吸光度(220nm、260nm)、溶存態の全窒素T-N、全リンT-P、NO₃を後記する方法で測定してゲルクロマトグラムを求めた。

水溶液中の分子の広がり度で分画する本法の分子量の値とゲルクロマトグラムの分配係数Kd値⁹⁾との関係は、分子量の標準液としてジールサイエンス社製の分子量400、1080、4126ダルトンのポリエチレングリコール、無水ぶどう糖(分子量180)、イソアミルアルコール(分子量88)を用いて同様の操作にて分取し、TOCでピーク溶出フラクションを測定することによって求めた。TOCは全有機炭素測定機(島津製TOC-500)を用いて測定した。化学的性状については今井等⁹⁾の手法により吸着樹脂を用いた濁水の分画を行い、疎水性塩基、疎水性酸、疎水性中性物質の各成分分離を試みた。ろ過サンプル中に含まれる溶存態有機物の疎水性成分と親水性成分は、Leenheer¹⁰⁾の定義に従って設定される検水200ml

を予め洗浄されたカラム(Supelite DAX8樹脂(Supelco 40-60 mesh, Amberlite XAD8と同等品)を3ml充填済)に通水させて分離した。疎水性成分が吸着したSupelite DAX8樹脂カラムに0.1M-HClを通水し、疎水性塩基を分離した。また、疎水性酸と疎水性中性物質を含む通過液はpH2に調整してSupelite DAX8樹脂カラムに通水した後、0.1M-NaOHで溶離させて疎水性酸を検出し、樹脂上の残渣物を疎水性中性物質とした。親水性成分は、陽イオン交換樹脂(Bio-Rad AG-MP-50, 100-200mesh水素イオン形)カラムを通水してカラムに保持された物質を親水性塩基、同様の操作で陰イオン交換樹脂(Bio-Rad AG-MP-1, 50-100mesh水酸基イオン形)カラムに保持された物質を親水性酸とし、両方通過した物質を親水性中性物質とした。それぞれ溶出した成分はTOCや紫外260nm吸光度で分析後、予め作成した検量線を用いて炭素分(μgC)を定量した。また、必要に応じて各画分の溶存態のT-N(μgN)、T-P(μgP)を後述する窒素・リン分析法で測定した。

ヨシ水路における水質測定は水温、化学的酸素要求量(COD)、生物化学的酸素要求量(BOD)、懸濁物質(SS)や総クロロフィル、全窒素(T-N)、全リン(T-P)、硝酸態窒素(NO₃)、リン酸態リン(PO₄)の9項目とした¹¹⁾。T-N、T-Pはアルカリ性ペルオキシ二硫酸カリウムを加えてオートクレーブ(165℃、30分)で分解して分析した。窒素成分はCu-Cdカラム還元-吸光度法、リン成分はモリブデン青吸光度法を原理とするブランベール社のTACS800によってそれぞれ自動分析定量した¹¹⁾。ヨシ中の炭素・水素・窒素はCHNコーダー(柳本製MT-5型)、全リンは硝酸-過塩素酸で湿式分解してモリブデン青吸光度法で定量した¹¹⁾。また、溶存態成分の水質測定は1μmガラス繊維濾紙(TOP製GD-120)で濁水をろ過した後、上述と同様な分析方法で行った。

3. 結果と考察

3. 1 ヨシの水路による濁水の水質変化とヨシの生育状況

Fig. 1(a), (b), (c)は2地点における全窒素濃度、溶存態全窒素濃度、硝酸態窒素濃度の変化を示す。全窒素濃度については、6月から7月末日までの流入出口の濃度差は0.6~0.8mg/lの範囲で変動したが、8月における2地点の濃度差は約0.3mg/l以内で変動した。溶存態全窒素濃度については、6月から7月末日までの2地点の濃度差は0.4~0.5mg/lの範囲で変動し、8月における2地点の濃度差は約0.2mg/lで変動した。硝酸態窒素濃度については、6月から7月末日までの2地点の濃度差は0.1~0.4mg/lの範囲で変動して8月には2地点の濃度差が非常に小さくなり、6月から8月ま

での期間における2地点の濃度差の変動は全窒素の濃度差および溶存態全窒素の濃度差の変動とほぼ同じ傾向になった。硝酸態窒素の除去が6月から7月まで活発であったが、8月に著しく低下した理由としては、硝酸態窒素の流入水中の濃度の変化が考えられる。

Fig. 2(a), (b), (c) は3地点における全リン濃度, 溶存態全リン濃度, リン酸態リン濃度の変化を示す。全リン濃度については、6月から7月までの流入口と流出口の濃度差は0.04~0.10mg/lの範囲で変動し、ヨシによる浄化傾向が明らかであった。しかしながら、8月には0.02~0.03mg/lと濃度差が縮まり、ヨシによる浄化作用が低下した。一方、溶存態全リンとリン酸態リンに関しては、流入口と流出口の濃度差が小さく、ヨシによる浄化作用が比較的低いことがわかった。

Fig. 3(a)~(f)はそれぞれ2地点における全BOD, 溶

存態BOD, SS, 全COD, 溶存態CODの値と総クロロフィル濃度の変化を示す。全BODの流入口と流出口の濃度差は6月の3mg/lから8月の0.5mg/lまで変動した。6月から7月にかけては、全BODがヨシによって減少したが、溶存態BODについてはヨシによる浄化がほとんど認められなかった。全CODと溶存態CODは6月から8月の期間で流入口, 中間点, 流出口の値がほとんど同じであり、ヨシによる浄化作用の少ないことがわかった。SSの値は流入口と流出口の差が10~60mg/lまで変動したが、8月には差が少ないことからヨシによる浄化作用の低下が認められた。総クロロフィルの2地点の濃度差は6月の約80μg/lから8月の20μg/lまで減少した。この理由の詳細は不明であるが、ヨシ水路による浄化作用は季節によって変動することと流入水中の濃度変化などが考えられる。

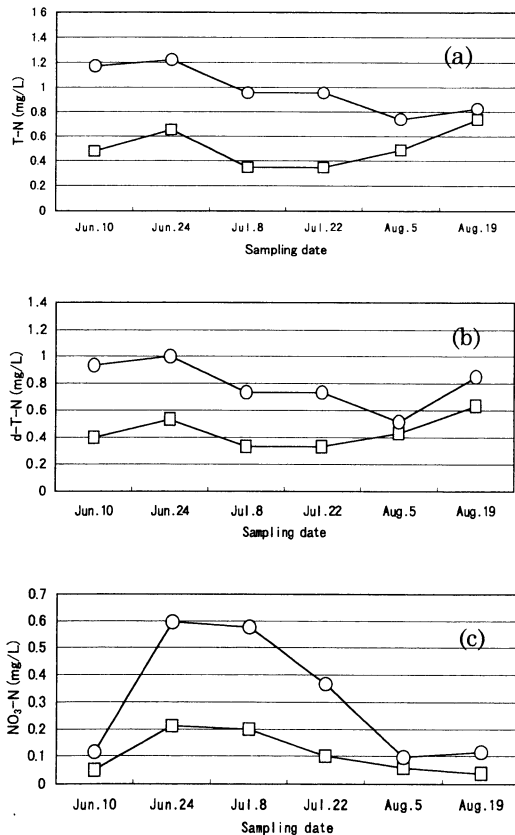


Fig. 1 Changes of nitrogen compounds in Kahokugata lagoonal water using reed bed system

(a) total nitrogen, (b) dissolved total nitrogen, (c) NO₃-N

○: influent point, □: effluent point

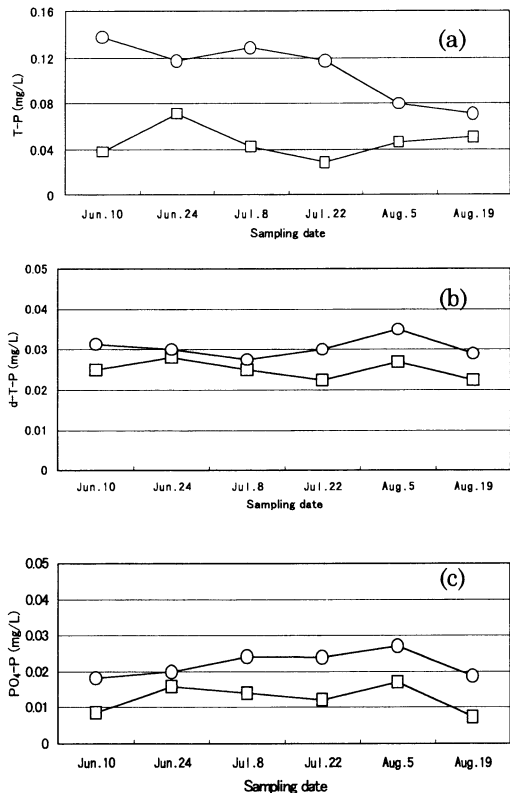


Fig. 2 Changes of phosphorus compounds in Kahokugata lagoonal water using reed bed system

(a) total phosphorus, (b) dissolved total phosphorus, (c) PO₄-P

○: influent point, □: effluent point

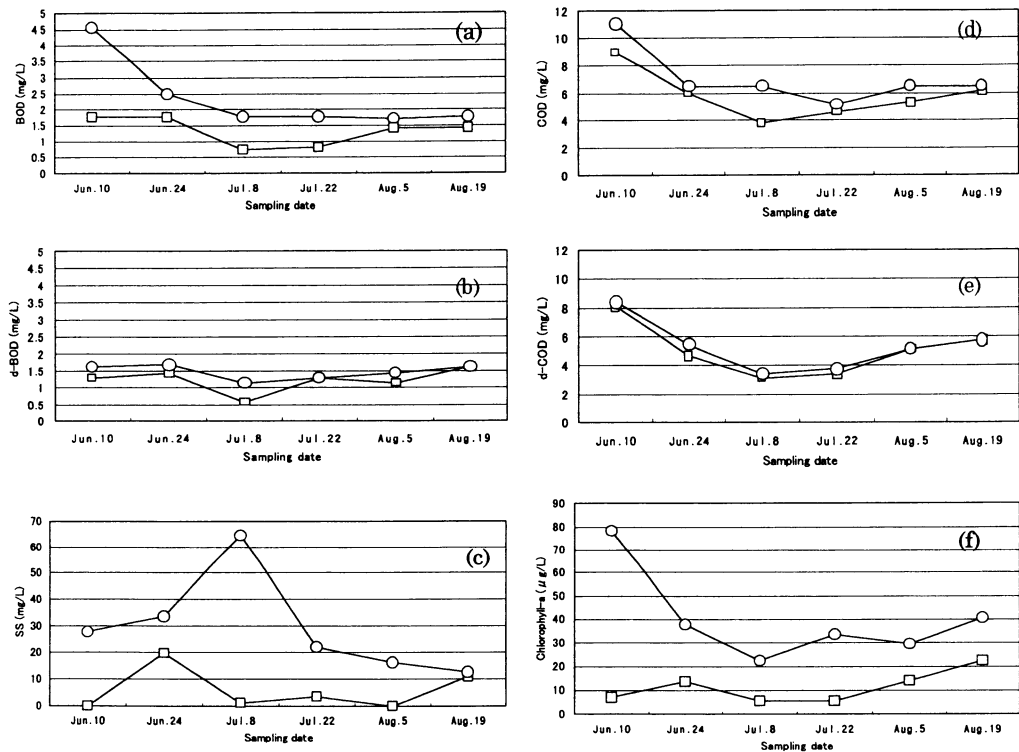


Fig. 3 Changes of water quality in Kahokugata lagoonal water using reed bed system
 (a) BOD, (b) d-BOD, (c) SS, (d) COD, (e) d-COD, (f) chlorophyll-a
 ○: influent point, □: effluent point

濁水含有成分に関する Figs. 1~3の結果、濁水の全窒素、全リン、全 BOD、全 COD、SS はヨシによってそれぞれ 46%、54%、73%、16%、73% 浄化されることがわかった。濁水中の溶存態全窒素、全リン、全 BOD、全 COD はそれぞれ 43%、16%、12%、0 と比較的少量の浄化になり、懸濁態成分の方が溶存態成分に比べてより浄化される結果となった。ただし、懸濁態全窒素と全リンの浄化作用はヨシによる吸収ばかりでなく、水路底層への沈降にも原因すると思われる。

Fig. 4 は流入口と流出口のヨシの成長を示す高さの経時変化である。両地点のヨシの背高は 6 月 10 日から 8 月 19 日までほぼ同じ傾向で増加した。7 月 22 日から 8 月 19 日までの期間のヨシの背高は特に著しく増加し、240~280cm (4.0~4.7kg) に達した。

Fig. 5 は乾燥ヨシ量当たりに含まれる全窒素量と全リン量の経時変化を示す。流入口における全窒素と全リン量ともに 6 月 10 日から少しずつ増加して 7 月 22 日に最大に達した後、減少した。流出口における全窒素量と全リン量は 6 月 10 日から徐々に増加した後に減少した。7 月 22 日~8 月 19 日の期間では流入口に比べて流出口の全窒

素量と全リン量がかなり小さくなったが、この期間は流入水中に含まれる窒素やリンの量が小さいためと考えられる。

3. 2 濁水の分画

Fig. 6(a), (b) と Fig. 7(a), (b) は平成 11 年 6 月 10 日のそれぞれ水路の流入口と流出口における濁水のゲルクロマトグラフィーによる結果を示す。図(a)は UV220, UV260, TOC, 図(b)は硝酸態窒素、全窒素、全リンの検出値である。縦軸は吸光度と濃度 (mg/l) の Relative Index (サンプルの濃度レベルの差異が大きいため、比較しやすいように適当な倍率を乗じた値)、横軸は 1 フラクション (= 5 ml) のフラクション数 (以下 Fr 数) である。Fig. 6(a) のクロマトグラムの値は Fr=24~33 の画分 1, Fr=34~44 の画分 2, Fr=45~54 の画分 3 に分画された。クロマトグラムの値を分子量換算すると、画分 1 の有機体は千数百から 4 千以上、平均 2200 ダルトンの分子量、画分 2 の有機体は数百から千程度、平均 370 ダルトンの分子量、画分 3 の有機体は低分子の有機体や無機塩などの数十から数百、平均 80 ダルト

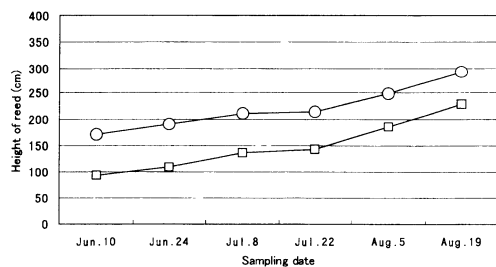


Fig. 4 Growth of reed in reed bed system
○: influent point, □: effluent point

ンの分子量になった。炭素 (TOC)、窒素、リン濃度を各フラクションで表したときのクロマトグラムの形状はそれぞれ異なった。全リンのクロマトグラムによると高分子側の成分が多く、低分子側の成分は少なかった。Fig. 6(b) の画分 1 における窒素分のピークは TOC のピークと一致し、両者の形状はほぼ類似であった。画分 2 と画分 3 における硝酸態窒素、全窒素、全リンの形状はそれぞれ異なり、TOC の Fr 数と一致しないこともあった。この理由は超純水を溶離液として用いたため、成分によってはセファデックス担体表面の負電荷との電荷による反発で、分子量に対応した滞留時間よりも早く溶出することなどが考えられる。画分 3 における硝酸態窒素分の Relative Index のピークの値と Fr 数が全窒素のそれらとほぼ同じになった結果、画分 3 の窒素分は硝酸イオンと考えられた。

Fig. 7(a), (b) は水路の流出口における濁水をゲルクロマトグラフィーによって検出した UV220, UV260, TOC の検出値と硝酸態窒素、全窒素、全リンの検出値である。縦軸と横軸は Fig. 6 と同様それぞれ吸光度と濃度の Relative Index を示す 5 ml を単位としたフラクション数である。横軸は画分 1 の Fr=24~33, 画分 2 の Fr=34~44, 画分 3 の Fr=45~54 に区分された。炭素、窒素、リンの濃度をフラクションで表示したクロマトグラムの形状にはかなりの差異が認められた。画分 1 における窒素のピークは炭素のピークと類似の形状になり、画分 2 と画分 3 においてもほぼ同様の結果になった。画分 3 の流出口における硝酸態窒素の Relative index が流入口の値の約 1/3 に減少したことから、比較的分子量の硝酸態窒素はヨシによって効率的に浄化されたといえる。全窒素については画分 1 の Fr=27, 画分 2 の Fr=37, 画分 3 の Fr=49 のそれぞれでピークをもつ残存は認められたが、それ以外の Fr ではほとんどゼロであった。全リンについては画分 2 と画分 3 がほとんど 0 になったことから、低分子量の全リンの浄化効果が認められた。

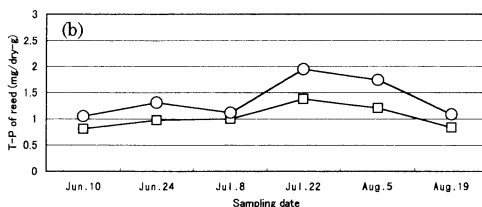
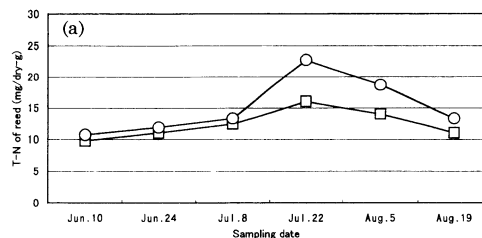


Fig. 5 Total nitrogen and phosphorus concentrations in reed
(a) total nitrogen, (b) total phosphorus
○: influent point, □: effluent point

3. 3 低分子量から高分子量の分離抽出液の 3 画分における種々の成分の検討

(1) 酸性、中性、アルカリ性について

今井¹⁾は疎水性と親水性、酸性と塩基性の違いに基づいた溶存有機態炭素 (DOC) 分画手法を用いて琵琶湖湖水および河川水の溶存有機物の特性や起源について検討している。本研究ではこの手法を水路を通過した濁水化学性状の変化に適用した。Table 2 は濁水が水路を通過する前と後の溶存有機態炭素の疎水性成分と親水性成分に含まれる酸性、中性、アルカリ性物質の検出値である。採取時期によって組成変化が認められるもののおおよそ親水性成分が疎水性成分より大きく、疎水性酸 (今井によれば、フミン物質) や親水性酸の割合がかなり高い結果になった。この傾向は測定数が少ないため年平均値である琵琶湖での測定結果²⁾と同一に比較できないが、類似しており、河北濁水の値は琵琶湖よりやや疎水成分が高く、同時に測定された農業系河川水より低く中間的なレベルを示している。ヨシを通過した濁水の性状の変化はいずれのいずれの試料でも疎水成分が微増する傾向があった。しかし、成分の酸や塩基についての成分については明確な傾向は無かった。

Table 3 は溶存有機物を分画した時の疎水性成分と親水性成分に含まれる酸性、中性、アルカリ性リン物質の存在比を示す。濁水がヨシ水路を通過すると疎水性成分が減少して親水性成分の割合が増加し、親水性酸の割合がかなり増加する傾向が認められた。親水性酸の中には窒素分の代表的な酸であるアミノ酸などが含まれている

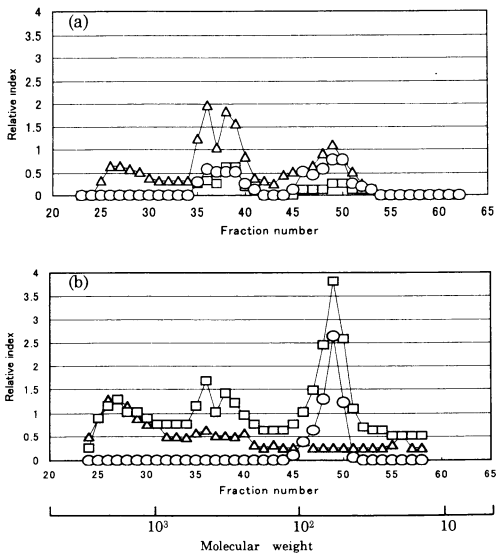


Fig. 6 Gel-chromatogram of Kahokugata lagoonal water at influent point using reed bed system on Jun. 10

(a) ○ : UV220, □ : UV260, △ : TOC
 (b) ○ : NO₃, □ : total nitrogen,
 △ : total phosphorus

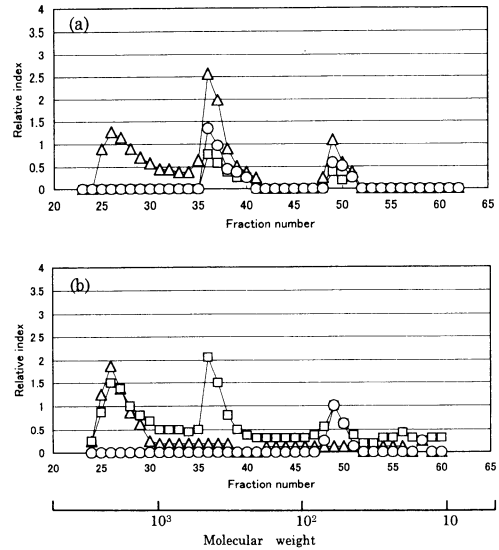


Fig. 7 Gel-chromatogram of Kahokugata lagoonal water at effluent point using reed bed system on Jun. 10

(a) ○ : UV220, □ : UV260, △ : TOC
 (b) ○ : NO₃, □ : total nitrogen,
 △ : total phosphorus

Table 1 Result of biodegradability calculated with DOC/absorbance 220 nm of fractionated lagoonal water by gel-chromatography

Date	Point	Biodegradability of fractional part (%)		
		Part 1	Part 2	Part3
Jun.10	Influent	47.7	32.7	32.9
	Effluent	38.5	30.8	30.5
Jun.24	Influent	46.4	49.2	59.3
	Effluent	42.6	49.0	55.3
Jul.22	Influent	44.6	55.0	81.2
	Effluent	38.0	44.0	72.5
Aug.4	Influent	46.0	58.8	78.4
	Effluent	42.2	56.6	75.4
Aug.19	Influent	39.0	64.6	76.1
	Effluent	38.2	58.9	65.5

と思われる。

(2) 親水性, 疎水性について

Table 4は溶存有機物を分画した時の疎水性成分と親水性成分に含まれるリンの存在比を示す。疎水性成分と親水性成分の割合は流入口では39.5%と60.5%, 流出口では21.3%と78.7%であり, ヨシ水路を通過すると親水性成分が増加することが確認された。

Table 5はゲルクロマトグラフィーによって分画された濁水の疎水性成分と親水性成分の割合を示す。低分子側(画分2と3)の親水性成分の割合は高分子側(画分

1)よりも大きかった。また, 流出口での親水性成分の割合は流入口よりも増加した。その結果, 水中の溶存態有機物はヨシ水路を通過すると除去され, 疎水性の画分の方が親水性の画分よりも除去される割合が高いことが示唆された。今後の課題は丹保ら¹⁰⁾の式などを用いた濁水の生分解性の検討, ヨシの生育に伴う窒素やリンなどの栄養塩の摂取, 有機物の沈澱, 土壌微生物による栄養塩や有機物の分解などのヨシ水路の浄化過程の詳細に関する検討などがあげられる。このうちヨシ水路の流入水質や底質の調査およびヨシ水路の浄化能力の速度論的考

Table 2 Classification of organic solutes in lagoonal water by dissolved organic carbon fractionation

Date	Point	Hydrophobic component (%)				Hydrophilic component (%)				Water temp. (°C)
		Total	Bases	Acids	Neutrals	Total	Bases	Acids	Neutrals	
Jun. 10	Influent	42.5	9.3	25.1	8.1	57.5	18.5	28.0	11.0	23.5
	Effluent	45.6	5.6	25.0	15.0	54.4	18.9	28.2	7.3	24.7
Jul. 22	Influent	32.7	3.9	28.6	0.2	67.3	16.5	37.0	13.8	27.5
	Effluent	33.3	3.0	28.0	2.3	66.7	12.5	42.8	11.4	26.7
Aug. 19	Influent	32.9	4.1	25.5	3.3	67.1	18.5	35.6	13.0	29.5
	Effluent	34.8	3.9	25.6	5.3	65.2	18.3	36.8	10.1	27.8

Table 3 Classification of organic solutes in lagoonal water by dissolved organic nitrogen fractionation

Date	Point	Component	Total ratio (%)	Bases (%)	Acids (%)	Neutrals (%)
Jul. 22	Influent	Hydrophobic	45.0	15.5	16.9	12.6
		Hydrophilic	55.0	2.7	39.4	12.9
	Effluent	Hydrophobic	12.7	5.0	3.6	4.1
		Hydrophilic	87.3	18.2	51.8	17.3

Table 4 Classification of organic solutes in lagoonal water by dissolved organic phosphorus fractionation

Date	Point	Component	Total ratio (%)
Jul. 22	Influent	Hydrophobic	39.5
		Hydrophilic	60.5
	Effluent	Hydrophobic	21.3
		Hydrophilic	78.7

Table 5 Chemical fraction of eluted part by gel-chromatography

Date	Point	Chemical separated component	Fractionated component ratio by gel-chromatography (%)		
			Part 1 (Fr.25-34)	Part 2 (Fr.35-44)	Part3 (Fr.45-54)
Jun. 10	Influent	Hydrophobic	75	45	10
		Hydrophilic	25	55	90
	Effluent	Hydrophobic	65	44	6
		Hydrophilic	35	56	94
Jul. 22	Influent	Hydrophobic	70	48	8
		Hydrophilic	30	52	92
	Effluent	Hydrophobic	67	45	7
		Hydrophilic	33	55	93

察については、今年度研究する予定である。

要 約

ヨシ水路による河北潟水の浄化について検討を行った。有機態炭素、窒素、リンそれぞれについて懸濁態と溶存態に分画し、溶存成分はさらにゲルクロマトグラフィーを用いて分子量別に分画して浄化の効果を調べた。全窒素、全リン、BOD、CODについては、溶存態よりも懸濁態の方がヨシ水路によってより効率的に除去されることが明らかとなった。ゲルクロマトグラフィーによって分けられた3つの溶存有機物画分のうち、ヨシ水路の通過後、最も分子量の小さい画分3のピークが減少したのに対して分子量最大の画分1のピークは増加し

た。ヨシ水路を用いた河北潟水の浄化後、親水性成分の割合が増大した。これは疎水性成分の除去される割合が親水性成分よりも高いことを示唆する。

文 献

- 1) 今井章雄, 福島武彦, 松重一夫, 井上隆信, 石橋敏昌: 琵琶湖湖水および流入河川水中の溶存有機物の分画, 陸水学雑誌, **54**, 53-68 (1998)
- 2) 滋賀県: 琵琶湖の有機汚濁に関する検討委員会資料 (1996)
- 3) 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**, 149-153 (1994)

- 4) 細見正明：ヨシ人口湿地による水質浄化法，用水と廃水，**36**，40-43（1994）
- 5) 細井由彦，城戸由彦，橋本一郎，今嶋美幸：ヨシによる栄養塩除去機能に関する研究，環境技術，**24**，27-31（1995）
- 6) 細見正明，須藤隆一：湿地による生活排水の浄化，水質汚濁研究，**14**，674-681（1991）
- 7) 塩田 勉，山田一裕，千葉信男，須藤隆一：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，水環境学会誌，**22**，505-510（1999）
- 8) 木村 基，楊 宗興，秋山博子，細見正明：¹⁵Nトレーサー法を用いたヨシフィルターの窒素除去性能に関する研究，水環境学会誌，**23**，703-709（2000）
- 9) 守屋 寛：ゲル濾過法の原理，pp3-7，「ゲル濾過法」，広川書店，東京（1970）
- 10) Leenheer, J.A.: Comprehensive approach to preparative isolation and fractionation of dissolved organic carbon from natural waters and wastewaters. *Environ. Sci. Technol.*, **15**, 578-587 (1981)
- 11) 公害防止技術と法規編集委員会：公害技術と法規 [水質編]，pp355-446，丸善，東京（1987）
- 12) 丹保憲仁，亀井 翼：処理性評価のための水質変換マトリックス（Ⅱ），水道協会雑誌，**531**，15-24（1978）