

下水処理水放流先水域に形成される 生物相に関する調査研究

1. はじめに

下水道の普及に伴い、下水処理水が放流先水域に占める量的割合が増加している。また、下水処理水を修景用水として再利用する事例が増加しているが、下水処理水を主たる水源とする水環境において形成される生態系の実体については、現状では十分に把握されていない。

放流先の生態系に対する下水処理水の影響力の大きさから、下水道事業にそれらに対する配慮が求められてきている。そこで、下水処理水を用いて多様な水生生態系を創出していくための下水道のあり方を検討することを最終目的とし、下水処理水の放流

及び再利用により形成される水環境の実態の解明、環境要因との関連等の検討を行うものである。そのため、本機構では、平成8年から建設省土木研究所（当時）より委託を受け、札幌市、東京都、横浜市をはじめとする都市との共同研究を行うことにより、調査を進めてきた。

2. 調査概要

2.1 調査対象地点の概要

過年度（平成8年～平成11年）の調査対象は表-1に示すとおりであり、平成12年度はこれに引き続き、表-2に示す6処理場の放流先の河川や処理水を利用した修景水路等を対象に調査を行った。

表-1 調査対象地点の概要（平成8年～平成11年）

処理場名	処理方式	消毒方式	調査地点数	調査内容
S処理場	標準活性汚泥法 +急速ろ過	塩素	y川 3地点 (処理水100%修景水路)	・流下過程における生物相の変化
N処理場	嫌気好気活性汚泥法	塩素	m川 3地点 (下水処理水が大部分を 占める都市河川)	・放流先河川への影響
T処理場	嫌気・硝化内生脱窒法 +PAC注入 +急速ろ過	オゾン	e川 4地点 (処理水100%修景水路)	・流下過程における生物相の変化
K処理場	標準活性汚泥法 +急速ろ過	オゾン	i川 3地点 (処理水100%修景水路)	・流下過程における生物相の変化 ・河床材料と生物相の関連
G処理場	嫌気好気活性汚泥法 +急速ろ過 +礫間接触酸化	紫外線 及び 塩素	安定池 1地点 k川 3地点 nk水路 1地点	・消毒方式と生物相の関連 ・放流先変更による影響

表-2 調査対象地点の概要 (平成12年度)

処理場名	処理方式	消毒方式	調査地点	調査時期	調査内容
A処理場	標準活性汚泥法	塩素	n川 4地点 (自然水:処理水=30:70)	7月, 9月, 11月	・放流先河川への影響
SK処理場	標準活性汚泥法	塩素	t川 5地点	8月, 11月, 1月	・放流先河川への影響
O浄化センター	標準活性汚泥法	塩素※1	ビオトープ 5地点	10月, 12月, 1月	・水深・流速と生物相の関連
Y浄化センター	凝集剤添加活性汚泥法+急速ろ過	紫外線※2	ビオトープ 3地点 冷却池及び植生池 4地点	9月, 12月, 2月	・消毒方式と生物相の関連 ・河床材料と生物相の関連 ・水深・流速と生物相の関連
J浄化センター	凝集剤添加活性汚泥循環変法+急速ろ過	塩素	J湖 5地点 (止水域)	11月, 12月 (生物相は12月のみ)	・処理水の影響範囲の把握 ・処理水量の増加に伴う影響範囲の変化(既往調査資料の解析)
KG浄化センター	標準活性汚泥法	塩素	d湾放流口 1地点 dバイオパーク内 4地点	10月, 12月, 2月	・塩素濃度と生物相の関連 ・植生浄化施設前後の生物相の比較 ・河床材料と生物相の関連

※1 O浄化センターは、ビオトープへは砂ろ過後、紫外線消毒の処理水を供給

※2 Y浄化センターは、ビオトープへは未消毒の処理水を供給

2.2 調査項目

環境要因と生物相の関連を把握するため、以下の項目について調査を行った。

- ① 現地測定項目—気温, 水温, 流量, 流速, 透視度, 電気伝導度, 溶存酸素量
- ② 水質分析項目—pH, 濁度, SS, BOD, TOC, T-N, O-N, NH₄-N, NO₂-N, NO₃-N, T-P, PO₄-P, クロロフィルa (Chl-a), 残留塩素, 色度
- ③ 付着物分析項目—乾燥重量, 強熱減量, クロロフィルa (Chl-a)
- ④ 生物調査項目—流下生物 (動物性, 植物性), 付着藻類, 底生動物, 魚介類, 水生植物, 微小動物

2.3 調査方法

現地測定項目, 水質分析項目及び付着物分析項目は、主に下水試験方法ならびにJISK0102に基づき測定した。また、生物調査項目については、以下のとおり調査を行った。

(1) 付着藻類及び付着微小動物 (定量)

水中の付着基盤 (石礫等) を取り上げ、5×5cmの枠を当ててブラシで擦り取ることによって付着藻類を採取する。採取した試料をホルマリン固定の後、持ち帰り出現種の同定, 計数を行う。

(2) 流下藻類 (定性)

ポリ瓶にて1ℓを採水し、ホルマリン固定の後、持ち帰り出現種の同定を行う。

(3) 流下動物 (定性)

プランクトンネットに20ℓを通水することで流下動物を採取し、ホルマリン固定の後、持ち帰り出現

種の同定を行う。

(4) 底生動物 (定量)

川底に30×30cmのコドラート (一定の区画を定めるのに用いる金属製の枠) を置き、コドラート内の石礫を下流側に置いた採集ネットに移し取る。石礫をバケツの中で洗って動物を落とし、1mmのフルイにあけてピンセット等で採集し、ホルマリン固定の後、持ち帰り出現種の同定, 計数を行う。

(5) 魚類 (定量)

投網にて採取後、現地にて種の同定, 計数を行う。

(6) 魚介類 (定性)

手網にて採集し、目視により確認する。必要に応じてホルマリン固定の後、持ち帰り種の同定を行う。

(7) 水生植物 (定性)

目視にて種類, 位置を確認する。必要に応じて採集し、持ち帰り同定を行う。

3. 調査結果と考察

生物調査項目の中でも付着藻類と底生動物はほとんど移動しないため、その地点での水質等の環境要因の影響を受けやすいと考えられ、有機汚濁や富栄養化, 重金属汚染等の生物指標に採用されている。本報告においても両者に着目し、考察を行うものである。

なお、生態系の構成は水質だけでなく、河床構造, 流速, 流量, 日照等多くの環境要因の影響を受けることから、下水処理水の影響を把握するためには、これらの要因と併せて考察することが必要となる。そのため本調査では、さまざまな環境条件の地点を選定し、ときには実験的に河床材料を設定すること

で生態系の実態把握を試みている。

過年度（平成8年度～平成11年度）の調査結果は表-3に示すとおりである。

これに対し、平成12年度においては次の①～④の項目に着目して調査結果を取りまとめた。このうち①～③については、過年度の調査結果との比較を交

えて考察を行ったものである。

- ① 処理水の流入による生物相の変化
- ② アンモニア性窒素濃度と底生動物の関係
- ③ 水理条件と底生動物の関係
- ④ 植生浄化池における生物相

表-3 過年度の調査結果から得られた知見と課題

調査目的	現状の知見	今後の課題
水質による影響	<ul style="list-style-type: none"> ・放流口においては、下水処理水の中に一般的に生育する緑藻類である <i>Stigeoclonium sp.</i> や水域に一般的に見られる珪藻類の <i>Navicula</i> 属の出現率が高い。 ・窒素栄養要求性の種である珪藻類 <i>Gomphonema parvulum</i> の優先する地点がある。 ・底生動物については水質との関連は明確でない。 ・底生動物の出現種の中にはアンモニア性窒素の濃度によって、生息に制限を受ける種があることが推察される。 ・アンモニア性窒素濃度が高くなると底生動物の多様性が低下する傾向がわずかながら見られる。 ・トンボ及びモノアラガイ科はアンモニア性窒素の濃度が高くなると出現が見られなくなるが、ミズムシ科やイトミズ科はアンモニア性窒素濃度がある程度の高さの水中でも生息が可能であると推察される。 	<ul style="list-style-type: none"> ・多様性指数については、生態系で重要な役割を果たしている少数種を軽く評価する傾向にあり、注意を要する。 ・水質の影響の把握においては、水理条件や河床材料等の影響と切り離して観察することが必要であり、条件を整理したうえでの調査・実験が必要である。 ・ある特定の種類のデータしかないため、多くのデータの蓄積が必要である。
消毒方式による影響	<ul style="list-style-type: none"> ・残留塩素が検出される地点では、塩素に対する感受性が低い単細胞製の緑藻類である <i>Chlorobion sp.</i> が特徴的に出現する。 ・底生動物では、イシビル、ミズムシ、ユスリカなどが残留塩素の影響が強い場合の代表的な出現種である。 ・藻類群集構成は、有機汚濁よりも栄養塩の成分組成や残留塩素濃度の影響を受ける。 ・底生動物についても残留塩素の影響は大きい。 ・残留塩素の生物相に与える影響は大きく、多様性の低下が見られる。 ・塩素消毒された処理水における生物相は、オゾン消毒や紫外線消毒された処理水におけるものより単純化する。 ・残留塩素濃度が高い放流口では種数及び個体数が減少し、底生動物は生息そのものが困難であることが推察される。 ・塩素消毒からオゾン消毒に変更した場合、生物の種類、個体数ともに増加した。 	<ul style="list-style-type: none"> ・残留塩素濃度がどのくらいのレベルであれば多様性が保たれるのかを知るためには、濃度が連続的に追跡できるようにデータが必要である。
河床材料による生物相の変化	<ul style="list-style-type: none"> ・河床材料として大礫、小礫、レンガ、砂を設置した場合、次の結果が得られた。 ・付着藻類の総細胞数は、砂での出現がない他は、河床材料による差は見られなかったが、種類数及び多様性指数は大礫>小礫>レンガの順であった。逆に汚濁指数は大礫<小礫<レンガであった。 ・底生動物では、固体数、種類数、多様性指数ともに大礫>小礫>砂>レンガの順であった。汚濁指数はレンガ<大礫<小礫<砂であった。 ・生物の多様性を増すためには、空隙の大きい河床材料が有利であることが推察される。 ・底生動物は藻類に比べ、河床材料や底質の影響を受けやすい。 	<ul style="list-style-type: none"> ・水質の変化がほとんどない地点での調査にもかかわらず、生物の汚濁指数は河床材料ごとの違いが見られた。よって、汚濁指数による評価は水質のみを反映しているのではなく、評価を行うにあたってはさまざまな要因を併せて検討する必要がある。
せせらぎ水路流下距離に伴う生物相の変化の把握（処理水100%の修景用水路）	<ul style="list-style-type: none"> ・流下に伴い付着藻類の細胞数は減少し、種類数は増加する傾向にある。これらの要因としては、次のことが考えられる。 ・放流口では処理水という特殊な条件にあった特性を持つ種のみが優先的に成長し、流下距離が伸びるに従い、様々な種が供給され増殖することから、流下に伴い種数が増加する。 ・放流口では構成種が少ないため競争が起こりにくく、効率良く増殖し細胞数が増えるが、流下に伴い構成種が増えるとともに種間の競争が激しくなり全体として細胞数が減少する。また、放流口に比べて細胞体の大きな種が出現することにより同じ生物量でも細胞数が減少する。 ・流下に伴い生物吸量は減少し、種数や多様性指数は上昇する傾向にあるが、水質の変化は明確でない。 ・結果として流下に伴い多様性指数が増加しているため、放流先水域の生物多様性を上げるためには、処理場内で水路を流して距離を取ってから河川へ放流する方法も考えられる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・流下に伴う多様性指数の上昇が、流下距離そのものが要因となっているのか、流下による水質の変化によるものなのか推定できない。 ・生物相の変化が、調査地点の環境条件によるものなのか、上流での環境条件の履歴によるものなのか不明である。
処理水が流入することによる生物相の変化の把握	<ul style="list-style-type: none"> ・処理水流入後においては細胞数や種類数はやや減少するが、多様性指数はほとんど変化しない。 ・生息する生物種の構成は大きな変化が見られる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・種構成と多様性指数を両面から捉えられる指標の導入が必要である。 ・流入する処理水質の影響度合いの指標化が必要である。 ・処理水の影響によって変化した生物相が、流下に伴い流入前の状態に復帰するかどうかの調査が必要である。
水理条件の違いによる生物相の変化の把握	<ul style="list-style-type: none"> ・シマトビゲラ科は生息に適する流速としては0.2～0.6m/sec程度、生息に適する水深としては20cm未満と推測される。 ・ミズムシ科の出現は、流速、水深ともに明確な傾向は見られない。 ・下水処理水が主となる水域においても、水理条件と出現種の間に関係があることが示された。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ある特定の種類のデータしかないため、多くのデータの蓄積が必要である。

3.1 処理水の流入による生物相の変化

図-1より、以下のことが推察される。

- ・種類数は放流口より合流前の方が高い。これは、放流口では栄養塩類や残留塩素等、放流水の特徴的な水質や、放流口という特殊な構造及び水理環境によって、放流水中に生育する生物種が限られたためである。
- ・細胞数は合流前より放流口の方が高い。これは、放流水中の高い栄養塩濃度に適した藻類種や、塩素への耐性のある種が増殖したことなどが理由である。

- ・多様性指数は放流口より合流前の方が高い。これは、放流水は河川水と比較して出現する種類数が少なく、特定の種が極端に増殖するためである。

以上は、放流口と合流前の比較であるが、処理水の流入前と流入後における河川の生物相を比較すると、次のとおりであった。

- ・種構成については、いずれの河川においても処理水の流入により緑藻類が増加した(図-2)。
- ・処理水の流入によりt川では種類数が増加し、n川では細胞数が増加したが、k川ではともに横

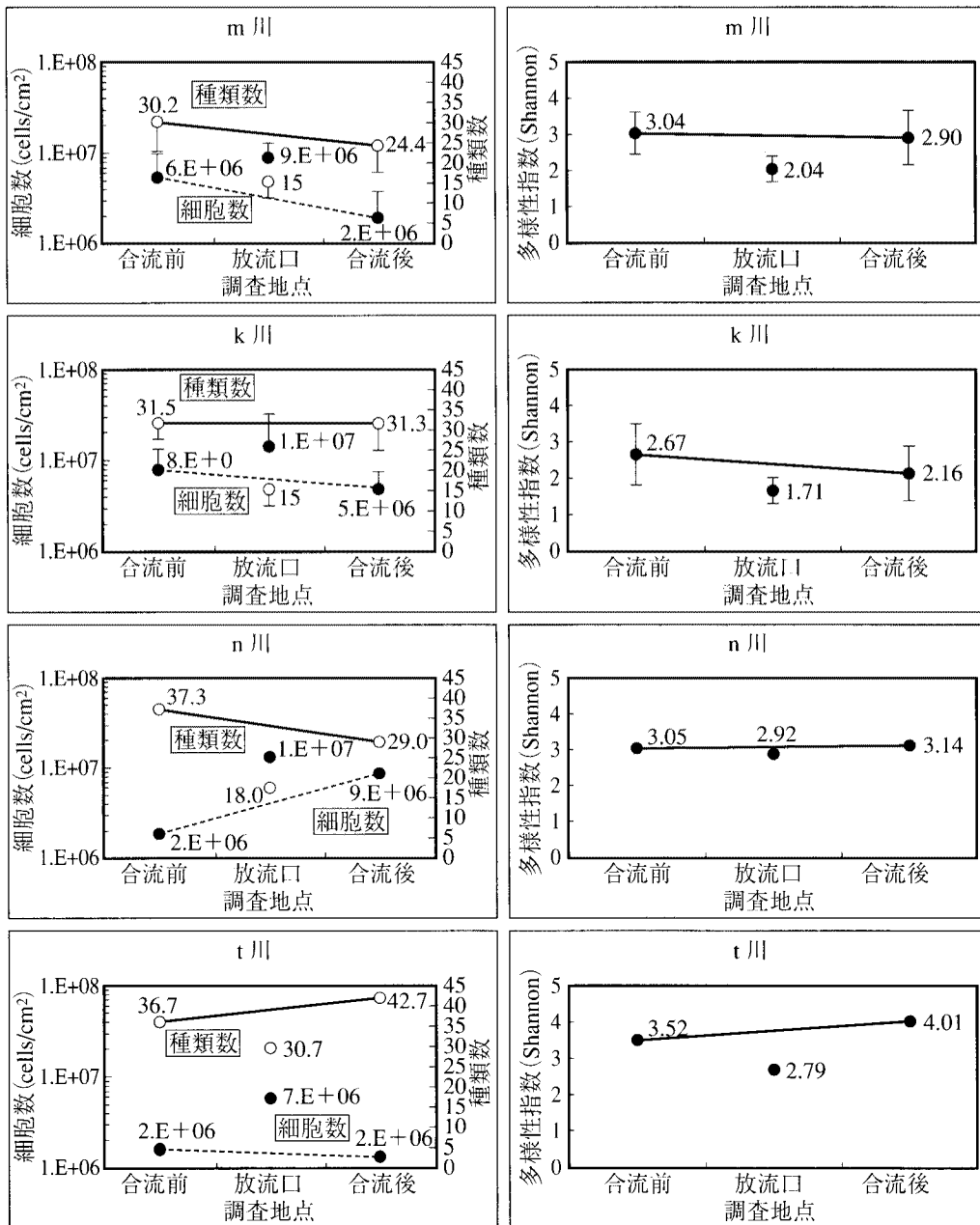


図-1 処理水流入による付着藻類相の変化

ばい, m川ではともに減少した(図-1)。

これらの要因を図-3に示す河川別特性から考察すると, 以下のことが推察される。

- ・ t川ではリンの増加量が大きく, n川では窒素の増加量が大きい, k川では相対的に栄養塩の変化が小さいことから, 細胞数, 種類数の変化には栄養塩類の濃度が影響を与えている可能性がある。
- ・ 栄養塩類濃度の高い環境では緑藻類が繁殖しやすいことが推察される。
- ・ k川とm川はコンクリートの三面張り構造で河床は平板な状態であるが, n川とt川では礫や砂を中心とした比較的自然的に近い状態となっている。よって, より自然に近く多様な構造の河川における方が, 細胞数, 種類数, 多様性指数が上昇することが推察される。

3.2 アンモニア性窒素濃度と底生動物

過年度の調査結果として, トンボ及びモノアラガイ科はアンモニア性窒素の濃度が高くなると出現が見られなくなるが, ミズムシ科やイトミミズ科はアンモニア性窒素濃度がある程度の高さの水中でも生息が可能であると考察されている。

平成12年度においても, 同様の分析を行った結果は図-4に示すとおりである。

dバイオパークにおいては上記考察とは異なり, アンモニア性窒素が比較的高濃度であるにもかかわらずモノアラガイ科が出現している。これは, 水深が浅く流速が緩やかで水生植物が存在するという環境がモノアラガイ科の生息に適しており, それがアンモニア性窒素の存在を補ったものとも考えられる。

また, 過年度の調査においてアンモニア性窒素濃度が高かったのはy川であり, ここではモノアラガイ科は出現していないが, その要因として残留塩素の影響も考えられる。よって, アンモニア性窒素濃度と底生動物の関係は, 消毒方式や生息環境等の要因を分離し, データを蓄積した上で再度考察する必要があるものとする。

3.3 水理条件と底生動物

過年度の調査結果では, シマトビケラ科

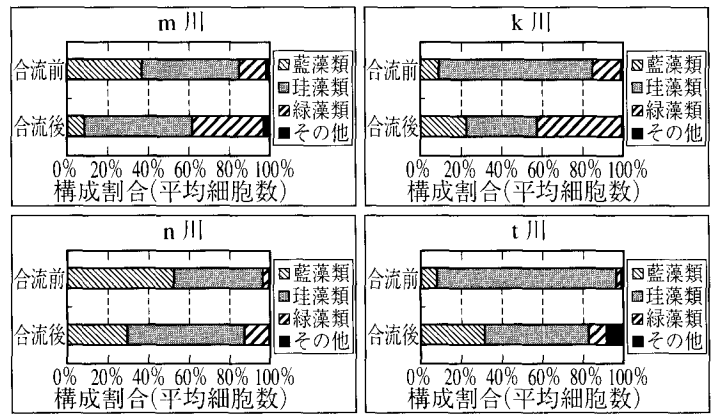


図-2 処理水流入による付着藻類構成比の変化

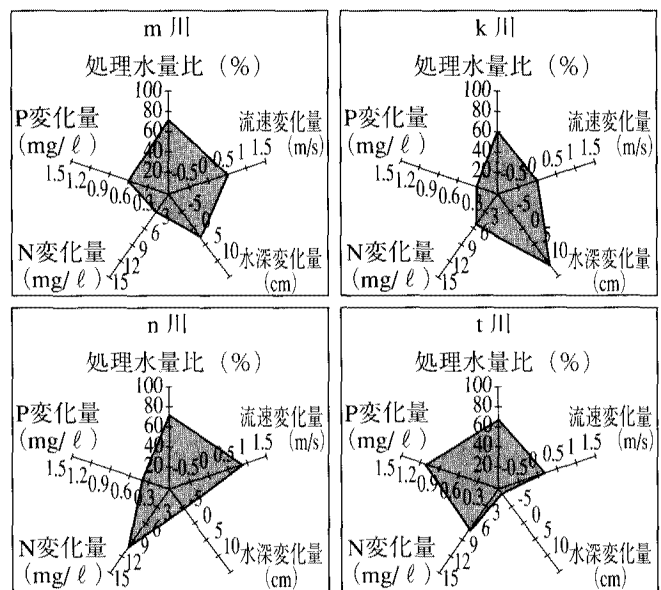


図-3 処理水流入による河川特性の変化

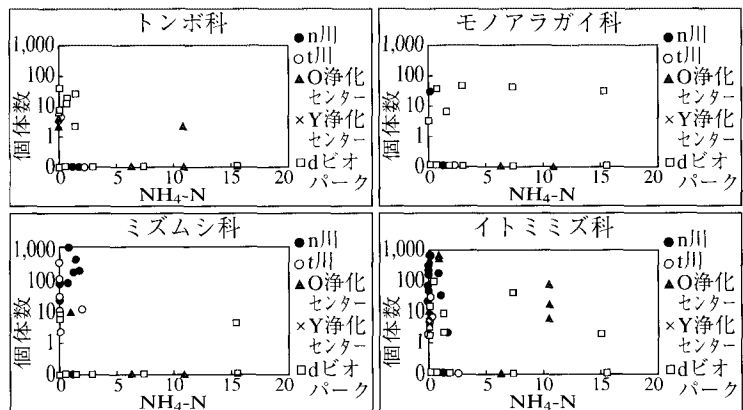


図-4 アンモニア性窒素濃度と底生動物の関係 (平成12年度調査結果)

の生息に適した条件は流速0.2~0.6m/sec程度、水深20cm未満であり、ミズムシ科については、流速、水深ともに明確な傾向は見られないと考察されている。

平成12年度においても同様の分析を行った結果は図-5に示すとおりであり、シマトビケラ科は流速0.4~0.5m/sec、水深30~40cmに出現のピークが見られ、ミズムシ科については、流速0.6~0.7m/sec、水深40~50cmにピークが見られた。

通常、シマトビケラ科の幼虫は網筒状の巣を作り、流下してくる植物プランクトン等を捕食する生態を持つことから、餌が供給されるための流速が必要であり、また、ミズムシ科は湖沼や溝において一般的に生息する種であり、過年度及び平成12年度の調査結果はこうした生態によるものと考えられる。

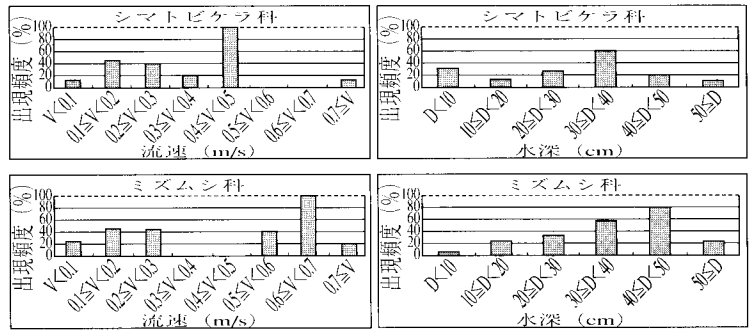


図-5 水力条件と底生動物の関係(平成12年度調査結果)

3.4 植栽地点における生物相

本年度の調査における3カ所の植生浄化池について、生物相の特徴を考察する。なお、これらの地点は処理水100%の水が供給されていること、池であることなど、比較的似かよった環境となっている。

(1) 環境特性

ここで取り上げる調査地点は、O浄化センタービオトープの礫間浄化施設前後の2つの池、Y浄化センターの植生浄化池、dバイオパーク内植生浄化池の4地点である。

各地点の特性を図-6に示す。

なお、Y浄化センター植生浄化池の河床材料は砂と礫、流速は0.8m/sec程度であるが、その他の植生池は、河床は泥、流速はほとんどない状況である。

(2) 生物指標

付着藻類と底生動物についての調査結果から、生物量や多様性についての指標をまとめると図-7に示すとおりである。

ここで、特に違いが見られたのは付着藻類の生物量を示すChl-aである。

O浄化センターの礫間浄化後の池やdバイオパークの池では、栄養塩類濃度が高いにもかかわらずChl-aが低く、Y浄化センターの植生池では栄養塩類濃度が低いにもかかわらずChl-aが高くなっている。通常、栄養塩類の増加に伴ってChl-aは増える傾向にあるが、本調査では逆の結果となっている。これは、Y浄化センター植生池では河床が砂礫となって

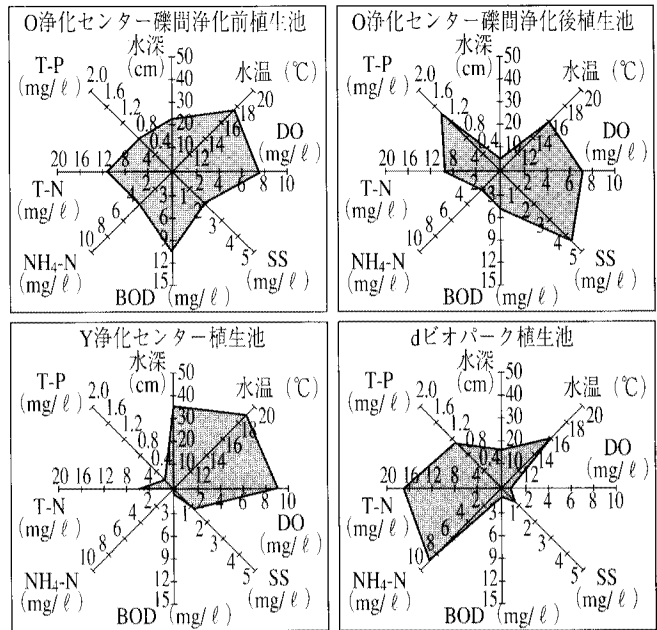


図-6 各植生浄化池の環境特性

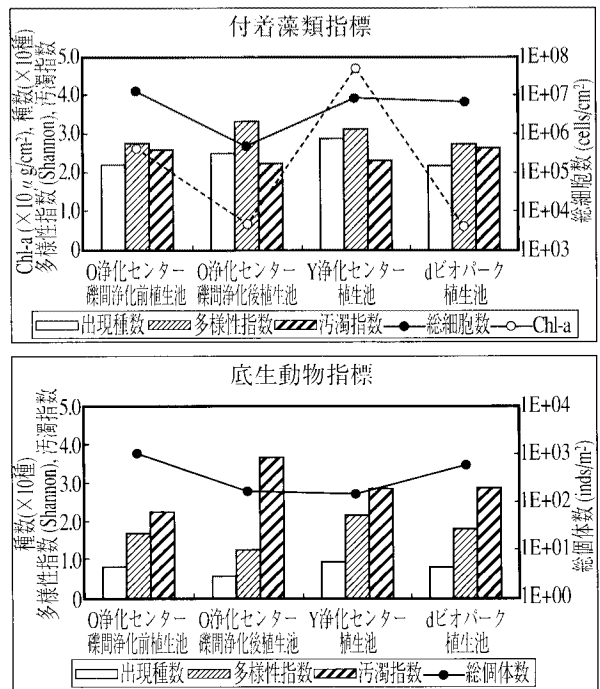


図-7 生物指標の比較

おり、藻類の付着基盤が提供されたことによるものと考えられる。

(3) 生物種構成

① 付着藻類

各植生池における付着藻類の属毎の種構成を図-8に示す。これによると、珪藻類の*Navicula*、藍藻類の*Phormidium*属が多く出現している。優占種のほとんどが珪藻類と藍藻類であり、緑藻類が優占種として見られたのはdビオパークの*Stigeoclonium*のみであった。

上記のような付着藻類構成種の類似性は、水温が17℃前後であること、植生池に繁る植物による日光の遮蔽、流速がほとんどないという水理条件が要因としてあげられる。なお、本調査結果が処理水特有のものかどうかを検証するためには、自然の河川水によって形成される植生池での付着藻類の状況と比較する必要がある。

② 底生動物

出現した種をすべて記載すると、表-4に示すとおりである。

ハエ目（ユスリカなど）やイトミミズ目が共通して見られたほか、モノアラガイ目やカゲロウ目なども多く見られた。なお、エビ目の多くはアメリカザリガニであり、人為的に移入されたものと思われる。

また、dビオパークの植生池においてはカゲロウやトンボといった比較的きれいな水域に棲む生物が見られていないが、その要因としてはアンモニア性

窒素濃度が高いことやDOが低いことが考えられる。また、植生池通過後のDOが回復し、アンモニア性窒素濃度が低くなった地点においてはトンボ目の出現があることから、上記水質状況が要因と推察される。

表-4 底生動物出現目

生物目名	O浄化センター		Y浄化センター	dビオパーク
	礫間浄化施設前	礫間浄化施設後		
モノアラガイ目	○		○	○
オヨギミミズ目				○
イトミミズ目	○	○	○	○
ナガミミズ目	○			
ウオビル目			○	
イシビル目			○	○
ウラジムシ目				○
ヨコエビ目				○
エビ目	○	○	○	
カゲロウ目	○	○	○	
トンボ目	○		○	
カメムシ目	○	○		
ハエ目	○	○	○	○

4. まとめ及び今後の課題

4.1 まとめ

過年度の調査結果を踏まえ、平成12年度に行った下水処理水放流先水域に形成される生物相に関する調査結果をまとめると、次のとおりである。

- ① 処理水流入により、生物相に以下の変化が見られた。
 - ・処理水流入により、緑藻類が増加する。その要因としては、栄養塩類濃度が高いことが推察される。
 - ・種類数、個体数、多様性指数の変化は河川毎に違う傾向が見られたが、栄養塩類濃度、河床材料の違いがその要因と考えられる。
- ② アンモニア性窒素濃度と底生動物の関係について、過年度の調査で生息が制限されるとされたモノアラガイ科は、平成12年度の調査結果では、同様の条件において出現している。その要因の解明には残留塩素の影響や、水理条件、生物の生態等と併せて考察することや、複数の条件を分離して調査することが必要である。
- ③ 水理条件と底生動物の関係について、過年度の調査と平成12年度の調査では調査結果に違いが見られるものの、それらの生態を考慮すると2つの結果に矛盾はない。このような調査においては、生物の生態を知ることと、より多くの

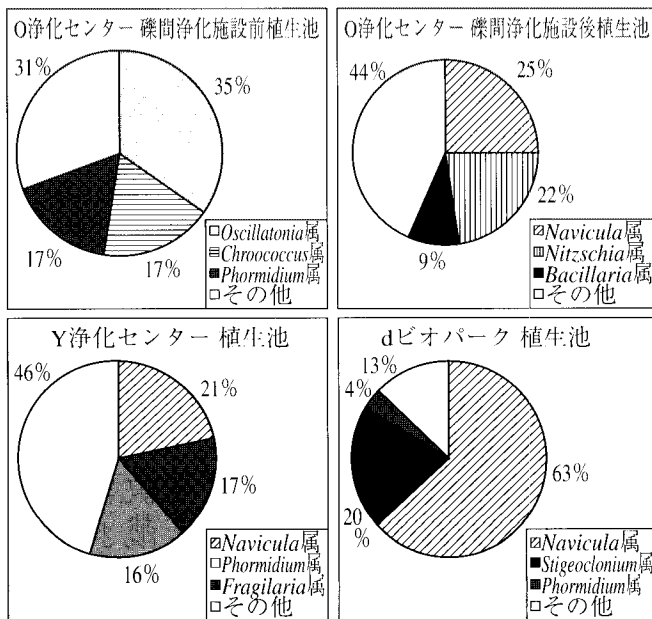


図-8 付着藻類出現属

データを収集して解析することが必要と考えられる。

- ④ 4箇所の植生浄化池における生物相について考察すると、以下のとおりである。
- ・ 付着藻類の種構成は珪藻類と藍藻類が多く、その要因としては、水温、日光の遮蔽、流速があげられる。
 - ・ 底生動物ではハエ目やイトミミズ目が共通して見られた。また、アンモニア性窒素濃度が高く、DOの低い地点では比較的きれいな水域に棲む生物は見られなかった。
 - ・ 処理水の影響を検証するためには、自然の河川水のみが流入する池での生物相との比較が

必要である。

4.2 今後の課題

今後の課題としては、次のとおりである。

- ① 生物種を考慮した多様性指標の検討
- ② 水質と汚濁指標の追随性の検討
- ③ 様々な条件を分離し、特定の項目に着目した実験的調査
- ④ 水質及び残留塩素濃度の影響度合いの指標化

今後はデータの蓄積を図るとともに、上記課題を検討することで、下水処理水が生態系に与える影響についてさらに研究を進めることが必要である。

●この研究を行ったのは

研究第一部長	江藤 隆
研究第一部主任研究員	小野塚敏彦
研究第一部研究員	川崎 貴義
研究第一部研究員	石渡 英樹

●この研究に関するお問い合わせは

研究審議役兼研究第一部長	宮原 茂
研究第一部主任研究員	小野塚敏彦
研究第一部主任研究員	笹尾圭哉子
研究第一部主任研究員	植松 龍二
研究第一部研究員	杉本 東
研究第一部研究員	野尻 希守