

下水処理水により生成される 生物相に関する調査研究

1. はじめに

下水道の普及にともない、下水処理水が放流水域に占める量的割合が増加している事例や、修景用水等として再利用され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態については、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、将来的には下水道事業に、それらに対する配慮が求められることが十分に予想される。そこで本研究は、下水処理水を用いて多様な水生生態系を創生していくための下水処理のあり方を検討することを最終目的とし、その第一段階とし

て下水処理水の放流先および処理水再利用等により生成される水生生態系の実態の解明、環境要因との関連等の検討を行うものである。そのため、現在本機構では、建設省土木研究所と連携し、札幌市、東京都、横浜市、大阪府と共同研究を行うことにより、調査研究を進めている。

2. 調査概要

2.1 調査対象地点

平成10年度は平成9年度までの調査に引き続き表-1に示す4処理場の放流先の都市河川、または処理水を利用した修景水路を対象に調査を行った。

表-1 調査対象地点の概要

処理場名	処理方式	消毒方式	放流先	放流口の河床状態	放流量 (m ³ /日)	調査地点
S処理場	標準活性汚泥法 +急速砂ろ過	塩素	修景水路 処理水100%	石畳	5,000	放流口から流下方向3地点
N処理場	嫌気好気活性汚泥法	塩素	都市河川	コンクリート張	27,000	放流口上流で1地点 放流口から下流に2地点
K処理場	標準活性汚泥法+急速砂ろ過+礫間接触酸化	オゾン	修景水路 処理水100%	平石	2,000	放流口から流下方向3地点
G処理場	嫌気好気活性汚泥法 +急速砂ろ過 +礫間接触酸化	紫外線 塩素	安定池 都市河川	砂礫 コンクリート張	20,000 50,000	安定池で1地点 放流口上流で1地点 放流口から下流に2地点 将来放流先水路で1地点
T処理場 (9年度 調査済)	嫌気硝化内生脱窒法 +PAC注入 +急速砂ろ過	オゾン	修景水路 処理水100%	砂利	5,000	放流口から流下方向4地点

なお、G処理場では一部の処理水を紫外線消毒した後、安定池に流入させ、最終的に塩素消毒して都市河川に放流している。

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、主に下水試験方法ならびに、JISK1012に基づき測定した。

- 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 生物調査－流下生物（動物性、植物性）、付着藻類、水生植物、底生動物、魚介類
- ③ 水質分析項目－pH、濁度、SS、BOD、TOC、T-N、有機-N、NH₄-N、NO₂-N、NO₃-N、T-P、PO₄-P、クロロフィルa、残留塩素
- ④ 付着物分析項目－乾燥重量、強熱減量、クロロフィルa

3. 調査結果と考察

本報告では特に付着藻類と底生動物に着目し、前記4処理場の放流口での出現種、出現率、多様性、消毒方式および水質との関係および紫外線消毒と塩素消毒の違い、河床材料の違いによる生物相の変化、せせらぎ水路流下過程における生物相の変化について報告を行う。付着藻類や底生動物は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おり、水環境を把握する上で、有用な情報源である。データは平成8年夏期～平成11年春期までにわたって行われた調査結果を用いた。

3.1 出現率および出現種

(1) 付着藻類

図-1に藻類優占種の出現率（藻類細胞数の出現割合で、最多のものを優占1位種、出現率2位のものを優占2位種とする）と出現種数を示す。優占1位種の出現率は、S処理場が最も高く、平均92%の出現率を示した。N処理場では、優占1位種の出現率は他の処理場と比して最も低く、平均で52%であり、反面その他の種（優占1、2位種以外）の出現率が他の処理場に比べて高い。K処理場は調査時期により、優占1位種の出現率が90%を超える場合も多いが、それ以外は40～60%程度の出現率である。また、G処理場は、優占1位種の出現率は平均56%でN処理場に次ぐ低さとなっている。

次に表-2に示す優占種の種類で比較すると、処理場および調査時期によって異なった種が優占している。S処理場では、9回の調査を通じて、*Chlorolobion sp.*が高出現率で優占1位種となり、総

出現種数も7種と単純な群集構成である。N処理場では調査時期毎に構成種が異なり、*Gomphonema parvulum*、*Phormidium*が優占する傾向にある。また、総出現種数は46種で他の3処理場に比して最も多様な群集構成を持っている。K処理場では全調査時期を通じて主に、*Stigeoclonium sp.*が優占1位種であり、総出現種数は39種である。また、G処理場においては、*Chlorolobion(cf.braunii)*、*Phormidium(cf.favosum)*が優先する傾向にあり、総出現種数は39種である。

(2) 底生動物

図-2に底生動物優占種の出現率と出現種数を示す。S処理場は9回の調査のうち5回は全く底生動物が認められなかったが、直近2回の調査結果によると出現種数の増加がみられた。

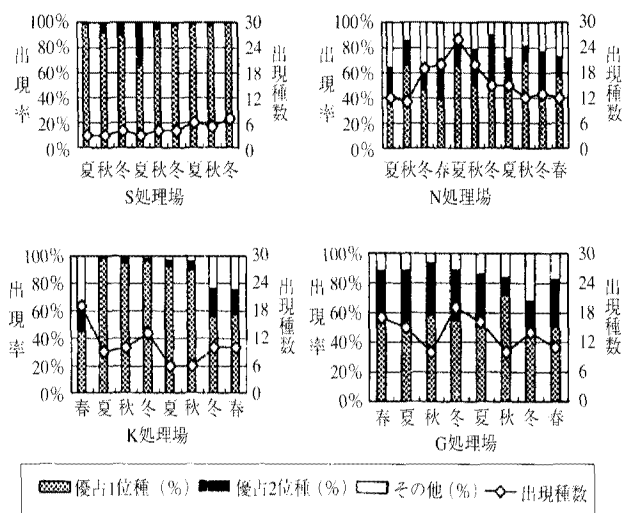


図-1 付着藻類出現率および出現種数

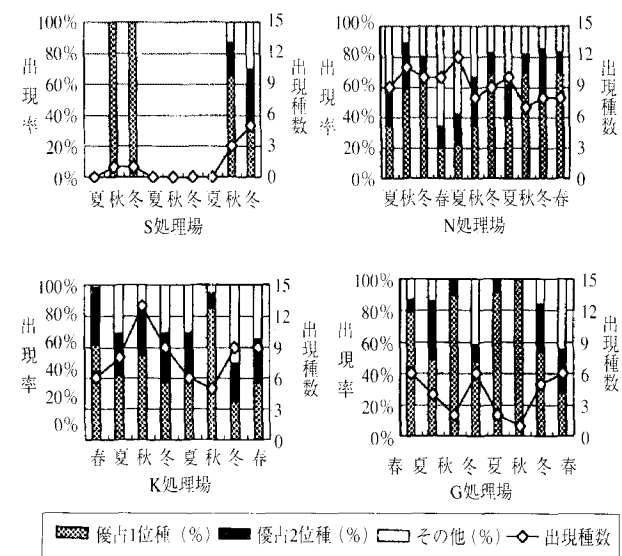


図-2 底生動物出現率および出現種数

表-2 付着藻類の優占種および総出現種数

	S処理場	N処理場	K処理場	G処理場
優占1位種	<i>Chlorolobion</i> sp.	<i>Gomphonema parvulum</i> <i>Phormidium</i> (cf. <i>favosum</i>)	<i>Stigeoclonium</i> sp.	<i>Phormidium</i> (cf. <i>papyraceum</i>) <i>Chlorolobion</i> (cf. <i>braunii</i>)
優占2位種	<i>Chlorolobion</i> (cf. <i>braunii</i>)	<i>Chlorolobion</i> sp. <i>Stigeoclonium</i> sp.	<i>Nitzschia palea</i> <i>Navicula minima</i>	<i>Stigeoclonium</i> sp.
その他の種	<i>Stigeoclonium</i> sp. <i>Scenedesmus spinosus</i>	<i>Navicula cryptocephala</i> <i>Nitzschia palea</i>	<i>Gomphonema parvulum</i> <i>Achnanthes lanceolata</i>	<i>Gomphonema parvulum</i>
総出現種数	7	46	39	39

N処理場では調査回毎に変動があり、昨年度調査では春から夏にかけて、その他の種の出現率は増加する傾向にあったが、本年度の調査ではこの限りでなかった。また、出現種数は8~13種で比較的安定していた。

K処理場についても、調査回毎に変動があり、出現種数は6~15種であった。

G処理場については、冬から春にかけて出現種数が増加し、夏から秋にかけて優占1位種の占める率が高くなる傾向がみられた。

次に表-3に示す優占種の種類で比較すると、S処理場では底生動物が確認できた4回の調査のうち優占1位種は、ユスリカ亜科、ユスリカ属、ミズムシであった。また、N処理場およびK処理場ではサホコカゲロウ、G処理場ではエリユスリカ亜科が優占1位種として出現する傾向にあり、総出現種数はK処理場が30種と最も多かった。

表-3 底生動物の優占種および総出現種数

	S処理場	N処理場	K処理場	G処理場
優占1位種	ユスリカ亜科 ユスリカ属 ミズムシ	エリユスリカ亜科 サカマキガイ ユスリカ属 サホコカゲロウ ヒメモノアラガイ ミズムシ	サホコゲロウ ミズムシ エリユスリカ亜科 アシマダラブユ属 コガタシマトビケラ	エリユスリカ亜科 ミズミズ科
優占2位種	ミズミズ科 サカマキガイ	ダニ目 エリユスリカ亜科	ユスリカ属 サカマキガイ カワコザラガイ	ユスリカ亜科 ユスリカ属 イトミミズ科 オヨギミミズ科
その他の種	エルユスリカ亜科 イトミミズ科	イシビル科 ブラチリア科 イトミミズ科 チョウバエ科	イトミミズ科 アメリカザリガニ コカゲロウ科 ガガンボ亜科 ユスリカ亜科	サカマキガイ サホコカゲロウ ユスリカ科 蝸 カイムシ目
総出現数	8	19	30	18

図-3に各処理場放流口の付着藻類の多様性指数を時系列に示す。調査時期により変動はあるものの相対的にS処理場は常に数値が低く、N処理場およびG処理場は相対的に高い数値を示している。またK処理場は調査時期によってばらつきがみられる。多様性指数が高いということは、種多様性が高く、安定した集団であることを意味し、本調査では、前記の優占種およびその出現率からみた藻類多様性の評価とほぼ合致していると思われる。ただし、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。

3.2 多様性指数による評価

一般に有機物あるいは有害物質の影響、富栄養化の進行等により生物相は単純化し、種の多様性が低下すると考えられる。種類数とそれぞれの個体数の両者を導入して、多様性を定量的に評価するものが多様性指数 (DI, Diversity Index) である。本報告では、情報理論に基づき最も一般的なShannonの式を使用した。

Shannonの式 $DI = - \sum_{i=1}^n P_i \cdot \log P_i$

P_i: 種類iの個体数の占める割合
n: 種類数

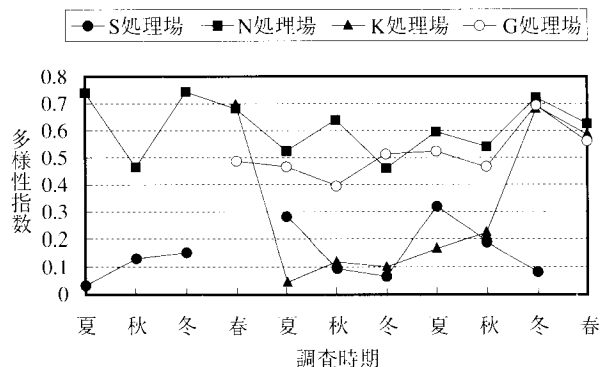


図-3 付着藻類多様性指数の変化

図-4に底生動物の多様性指数を示す。S処理場およびN処理場間の相対的な位置関係は付着藻類と同様であり、N処理場の多様性が大きい。またS処理場およびG処理場では底生動物が出現した場合でも1種類のみであったため、多様性指数はゼロとなった。

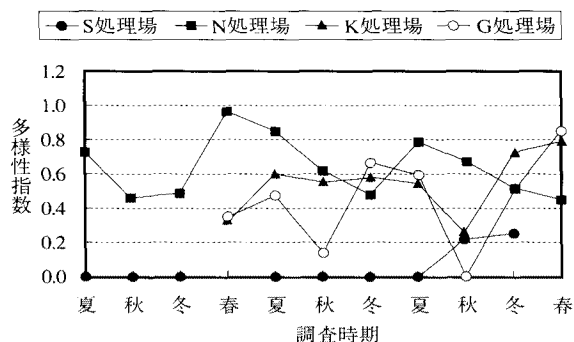


図-4 底生動物多様性の変化

3.3 水質および消毒方式の影響

表-4に放流口での平均水質、標準偏差を示す。

塩素消毒を行っている処理場の放流口に共通して緑藻類の一種 *Chlorolobion sp.* が出現しており、特に残留塩素の多いS処理場においては高出現している。細胞性の緑藻類には塩素に対する感受性が低い種類があることが知られており、S処理場放流口では残留塩素の影響により、付着藻類群集の多様性が低下していると考えられる。

N処理場放流口では残留塩素濃度が低く、*Chlorolobion sp.* は出現しているものの、窒素栄養要求性の種である珪藻類 *Gomphonema parvulum* が優占する傾向にある。

各処理場の放流口で出現した緑藻類の *Stigeoclonium sp.* は下水処理水中に一般的に生育する緑藻類として知られている。

水質の影響による生物相の明確な関連を把握するために、今後も調査を行い、データを解析していく必要がある。

3.4 残留塩素との関連

S処理場の放流水路では、平成9年度までの調査(6回)において残留塩素が高い濃度でしばしば検出されていたが、平成10年度の調査(3回)においてはほとんど検出されなくなっていた。そこで、平成9年度までの調査結果と平成10年度の調査結果とを残留塩素濃度と付着藻類及び底生動物について比較した。

放流口地点の結果を表-5に示す。

特に残留塩素の高かった放流口地点では塩素濃度の低下につれて付着藻類、底生動物ともに個体数・種類数が増加したが、それ以外の地点においては明確な傾向はみられなかった

3.5 紫外線消毒と塩素消毒の違い

G処理場においては安定池の流入部に紫外線消毒装置が設置され、また河川への放流水には塩素消毒が行われている。この安定池と放流口における処理水は同一処理場からの処理水であり、水質としてはほぼ同じと考えることができる。

したがって、多様性指数や汚濁指数についてのこれらの地点における違いは、消毒方式の違いが生物相に与える影響を内包するものと考えられる。

そこで、まずこれまでの調査結果のうち多様性指数と汚濁指数についての各調査ごとの結果を平均した値を表-6に示す。

汚濁指数とは、生物の群集構成による河川の水質階級の算定方法である。

汚濁指数の算定法は、まず生物出現数を出現頻度(h)によって何段階かに分け、次に、生物を有機汚濁の耐性による汚濁階級(s)として4段階に分ける。

表-4 放流口の平均水質(標準偏差)

処理場名	(mg/l)					
	BOD	T-N	NO ₃ -N	T-P	PO ₄ -P	残留塩素
S処理場	0.94 (0.82)	10.42 (2.50)	7.31 (2.11)	0.15 (0.04)	0.11 (0.08)	0.73 (0.74)
N処理場	1.42 (0.46)	10.79 (1.89)	9.86 (1.82)	0.80 (0.46)	0.67 (0.42)	0.02 (0.03)
K処理場	4.16 (3.27)	15.56 (3.16)	11.78 (2.43)	1.93 (0.36)	1.70 (0.23)	—
G処理場	1.36 (0.52)	9.72 (1.32)	8.37 (1.23)	0.75 (0.58)	0.61 (0.49)	—

表-5 残留塩素濃度の変化に伴う生物相の変化

	残留塩素 (mg/ℓ)	付着藻類 (細胞数) (cells/cm ²)	付着藻類 (種類数)	底生動物 (固体数) (inds/m ²)	底生動物 (種類数)
放流口地点					
H.9年度までの平均	1.07	12,200,000	3.2	4.3	0.5
H.10年度の平均	0.06	14,200,000	6.3	37.7	3.3
放流口から629m下流地点					
H.9年度までの平均	0.68	8,500,00	5.0	3,163	8.2
H.10年度の平均	0.05	3,200,000	5.7	2,939	8.7
放流口から1,420m下流地点					
H.9年度までの平均	0.18	5,200,000	9.0	21,462	7.7
H.10年度の平均	0.03	5,000,000	14.3	24,643	4.7

表-6 消毒方法の違いによる比較

	安定池 (紫外線消毒)	放流口 (塩素消毒)
多様性指数 (付着藻類)	2.51	1.58
多様性指数 (底生動物)	1.75	1.30
汚濁指数 (付着藻類)	2.5	3.5
汚濁指数 (底生動物)	3.2	2.8

こうしてある1地点の調査において、そこに出てくるいくつかの種類の出現頻度 (h) と汚濁階級指数 (s) とを用いて、以下に示す計算式によって算定したものが汚濁指数である。

本調査での汚濁指数の算定法を以下に示す。

$$\text{汚濁指数 (S)} = \sum (s \times h) / \sum h$$

h：出現頻度の例 (データにより区切りとする細胞数や段階数を変化させる)

個体数 (あるいは細胞数) の桁数 (1桁=1, 2桁=2...) を与えた。

s：汚濁階級

- 1 = 貧腐水性指標種
- 2 = β 中腐水性指標種
- 3 = α 中腐水性指標種
- 4 = 強腐水性指標種

ここでみると、安定池と放流口との間で付着藻類の比較において、放流口と比べて安定池、すなわち紫外線消毒による水域の方が清冽と評価され多様性も高かった。しかし、底生動物においては明確な違いや傾向はみられなかった。

次に、付着藻類の分析結果をもとに、各水域における各出現属の平均優占率を計算した。これをみると、安定池では最優占属が占める割合が50%以上と高い割合を示しているが、2位以下の優占種が占める割合はそれぞれ2割以下であり、出現した属数も合計で26となっていた。

一方で放流口においては最優占種の優占率は4割強と安定池の優占率に比べて小さかったものの、優占2位の属が占める割合も4割を超えており、1位と2位の差が小さくこの2属で8割以上を占めてしまっている。このため、他の属が占める割合は安定池に比べて小さく出現属数も20属となっていた。

また、放流口においては塩素消毒がなされている水域に特徴的に出現する種と考えられる *Chlorolobion* 属が出現し、細胞数の占める割合も40%以上と高かった。

これらのことから付着藻類については、塩素消毒の影響を受けている放流口においては紫外線消毒を行っている安定池に比べて単純な生物相となりやすい傾向が推察された。

一方、底生動物については汚濁指数からみると、目立った違いはみられなかったが、多様性指数からみると安定池における多様性指数が放流口における計算値を上回っており、塩素消毒と比較して紫外線消毒の方が高い多様性を示す傾向がみられた。ただ

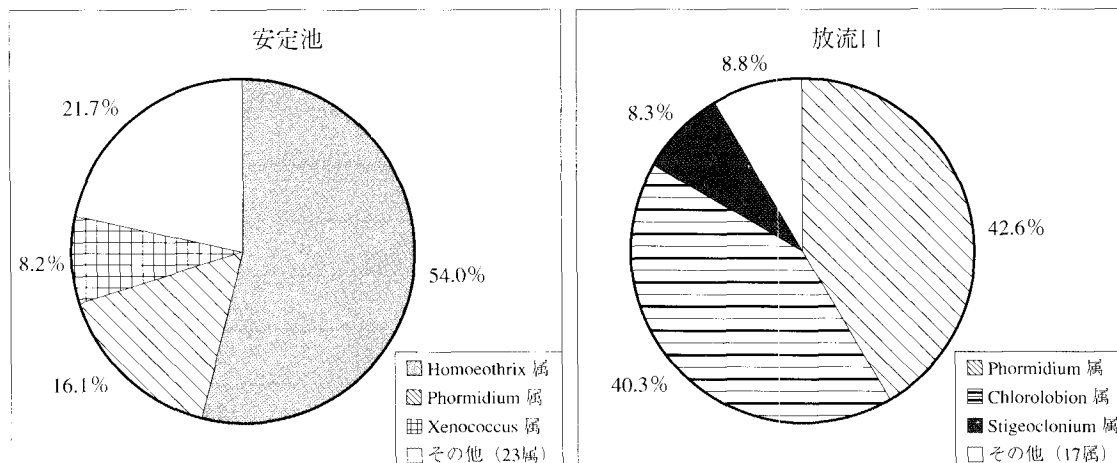


図-5 付着藻類の平均優占率

し、底生動物における生息の重要な要素である河床形態が大きく異なることから、上記の数値の違いが水質の影響だけに由来するものではないと考えられる。

以上のように、紫外線消毒と塩素消毒の各水域における生物相には違いがみられたが、生じたこれらの差は消毒方式の違いのみによるものではなく、各調査地点の水深や流速、河床形態といった水理条件がかなり異なる地点であることも違いの要因の一つであると考えられるため、消毒方式の違いとして評価するにはもう少し条件を整理した調査・実験が必要となると考えられる。

3.6 河床材料の違いによる生物相の変化

平成10年度においてK処理場放流先のせせらぎの下流部にあたる調査地点では、処理水域に生成される生物相が河床材料によってどのように変化するかを調査するために、河床の材料を4種の材質で構成する区画を設置し、それぞれの材質の区画で底生動物及び付着藻類についての分析を行った。

(1) 実験方法

実験に用いた素材としては、せせらぎ等を設置する際に用いる材料を想定して「レンガ」「大礫（径10～15cm）」「小礫（径2～5cm）」「川砂」の4種を設定した。設置はプラスチック製の網籠（実効面積30×30cm²）に材料を均一に敷き詰め、それを籠全体が水に浸かり、素材の上を水が流れる位置の河床に置くように行った。なお、砂については籠から流出しないよう麻製の土嚢袋を内側に敷いた。

また、籠は1つの素材につき2個設置し、1つを付着藻類用、もう一つを底生動物用とした。

10月30日に実験用河床材を設置し、73日後の1月

11日にそれぞれの籠からサンプルを採集し、分析を行った。

(2) 結果

個体数及び出現種数に加え、多様性指数と汚濁指数について計算した値を以下に示す。

(3) 河床材料の違いによる影響

結果から、以下のことが考えられる。

- ・底生動物において個体数、種類数および多様性指数ともに大礫が最も高く、次いで小礫が高く、レンガが最も低い値を示した。
- ・付着藻類においては出現した総細胞数は砂で観察されなかったことを除けばほぼ同じであったが、種類数と多様性指数は底生動物と同様に、大礫>小礫>レンガの順であった。

これらの区画はほぼ同一地点に設置したため、水質としてはほぼ同じであったと考えることができるにもかかわらず、計算された汚濁指数は設置した河床素材によってある程度の差が生じており、汚濁指数による評価が水質のみを反映しているわけではな

表-7 河床材料の違いによる変化（付着藻類）

	現地 河床	変更素材			
		砂	小礫	大礫	レンガ
出現種数	9	0	15	16	12
細胞数 (cells/m ²)	125,124	0	1,826	1,436	1,262
汚濁指数	2.0	-	2.7	2.5	3.0
多様性指数	1.4	-	3.0	3.7	2.7

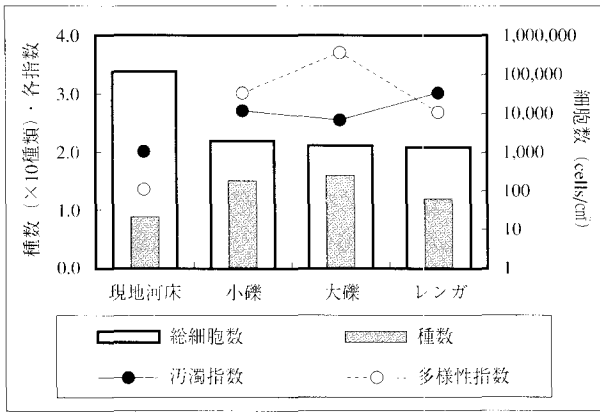


図-6 河床材料の違いによる変化 (付着藻類)

く、評価を行うにあたっては様々な要因を併せて検討する必要があることが示された。

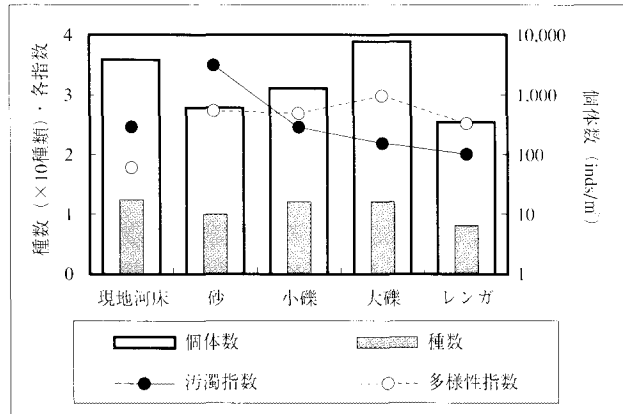


図-7 河床材料の違いによる変化 (底生動物)

表-8 河床材料の違いによる変化 (底生動物)

	現地河床	変更素材			
		砂	小礫	大礫	レンガ
出現種数	13	10	12	12	8
個体数 (inds/m ²)	3,973	610	1,299	8,078	344
汚濁指数	2.5	3.5	2.4	2.2	2.0
多様性指数	1.8	2.7	2.7	3.0	2.5

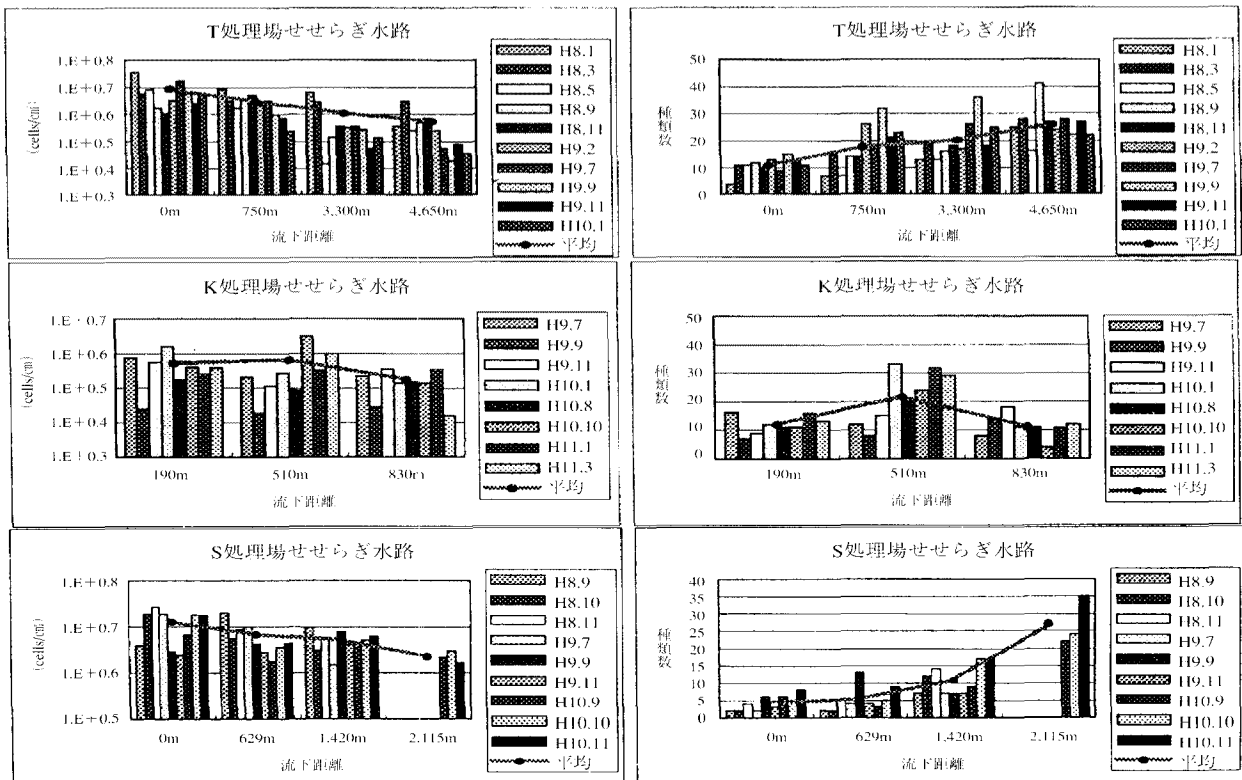
3.7 せせらぎ水路流下過程における生物相の変化

この調査においてはS処理場, K処理場, 平成9年度までの調査地点であったT処理場の3ヶ所のせせらぎにおいて調査を行った。

これらの調査結果のうち生物, 特に付着藻類についてその流下過程の変化の比較を行った。

(1) 結果

調査結果を図-8に示す。



付着藻類 (細胞数)

付着藻類 (種類数)

図-8 各せせらぎにおける付着藻類相の流下過程変化

下流に行くに従って付着藻類の総細胞数は減少するが、種類数は増加する傾向がうかがわれた。

なお、K処理場においては若干この傾向からはずれる点もみられるが、せせらぎの距離が短く調査地点間の距離が短いことから明確な差がみられないことによると考えられる。

(2) 流下過程変化の要因の推測

【種類数の増加について】

せせらぎでは放流口からの処理水が水量の総てであるため、放流口においては基本的に藻類の供給がなく、空気中などの外部から供給される藻類の内、その水域に合った特性（消毒に耐性がある、成長が早い、付着性が高い、など）を持ったいくつかの藻類種が優占的に成長するものと考えられる。この後、流下距離が伸びるに従って、より多くの藻類種が供給され増殖することから、付着藻類の種数が増加していくものと思われる。

【細胞数の減少について】

水質分析の結果によると流下によって栄養塩濃度に目立った変化はみられないことから、栄養塩が上流側で消費されることが下流側における細胞数の減少の要因とは考えられない。

例えば放流口では構成種が少ないことから競争が起りにくいいため効率よく増殖し細胞数が多くなるが、下流において構成種が増えると種間の競争が激しくなるため全体としても細胞数が減少することや、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など要因として考えられる。

4. 調査・利用マニュアル案の検討

本調査を基として、処理水の放流先水域への影響を把握することを目的とした調査マニュアルを作成するにあたり、マニュアルの骨子となる方向性について以下の項目について検討した。

- (1) 調査の適用範囲
- (2) 調査方法に関する事項

- ① 放流先水域における現地調査方法
 - ② 処理方法との関連を把握するための調査対象選定
- (3) データ利用に関する事項
- ① 水質と生物の関係把握
 - ② 放流水が生物に与える影響の評価
 - ③ 望まれる生物相に適した放流水質や放流方法の設定
 - ④ 現状の問題点の把握

次年度以降も調査・利用マニュアル案作成の検討を行っていく予定である。

5. まとめおよび今後の課題

5.1 まとめ

下水処理水中に生成される水生生態系の実態解明のために、処理水および修景用水放流口での付着藻類、底生動物の群集構成等を比較検討した結果、次のことがわかった。

- ① 処理場毎に藻類および底生動物優占種の出現率、出現種の違いが見られた。
- ② 各調査地点の多様性指数により、群集構成の多様性の差を評価できた。
- ③ 残留塩素が付着藻類および底生動物に与える影響は非常に大きく、多様性の低下が観察された。
- ④ 異なる河床材料条件において付着藻類および底生動物の種類数および総細胞数、個体数の傾向が確認できた。
- ⑤ せせらぎ水路流下過程において付着藻類の種類数の増加および細胞数の減少が確認できた。

5.2 今後の課題

本調査研究は、環境要因と生物相の関連解析のために、種々の特徴を有する新規調査箇所を増やしつ、長期的な調査・研究を行う必要がある。

●この調査研究に関する問い合わせは

研究第一部長	大嶋 吉雄
研究第一部主任研究員	鈴木 文雄
研究第一部研究員	王尾 和寿