

◆ 報 文 ◆

下水処理水中の栄養塩と水生生物相との関連性

竹歳健治* 中島英一郎** 平出亮輔***

1. はじめに

下水道の普及に伴って、処理される下水処理水の量も増加し、1年間で琵琶湖の容積の半分弱にあたる約130億 m^3 (平成12年度現在)もの下水処理水が、日本全国の下水処理場から放流されている¹⁾。

そのため、下水道が普及した都市域の河川では、河川水量の大半が下水処理水で占められているところも出てきている。そのような河川では、河川の水質や水理水文特性等が下水処理水の性状や排出状況に大きく左右され、さらには水辺環境や周辺の生態系まで影響を及ぼすことが懸念されている。

また近年では、水辺環境の再生を目的として、下水処理水を修景用水として再利用し、涸れ川やせせらぎへ放流する事例も増加している²⁾。

しかしながら、下水処理水の放流先となっている河川や下水の再生利用で創出される水路等で見られる藻類や水生昆虫、魚類等といった水生生物相は、ある程度汚濁を受けた水域で見られる種が主となっており、水生生物の良好な生息環境が実現できているとは言えないのが現状である。

そこで、下水処理水により形成された水辺環境が、良好な水生生物の生息環境であるために必要な下水処理方式や処理レベル(窒素・りん除去や消毒のあり方)等に関する知見が求められている。

下水処理研究室では、藻類、底生動物といった水生生物相と、下水処理水の水質や放流先の水理条件等の環境要因の関係を明らかにし、下水処理水の放流先において水生生物の良好な生息環境を再生、創出するために、効果的かつ経済的な下水処理システムのあり方を提示することを目的として、調査を行っている。

本報では、それらの調査のうち、栄養塩濃度と形成される水生生物相の関係を検討した結果を報告する。

2. 既往の研究

2.1 研究の傾向

水生生物に対する下水処理水の影響に関する研究事例は、約20年前頃から見受けられるようになってきた。最近20年間の研究事例を、JICSTデータベースで検索して整理した結果を図-2.1に示す。

初期の事例では、ノリ養殖への影響やユスリカの発生等、問題に対する原因追及を主眼としていた事例が主であったが、1980年代後半からは、下水処理水の再利用による水辺環境の創出が行われはじめたこともあり、そのような箇所における水生生物の実態調査事例が増加するようになった。1990年代半ばからは、下水道普及率の向上や環境意識の高まりを受け、下水処理水の再利用事例に加え、下水処理水の放流先河川など公共用水域における水生生物への影響について調査する事例が増加してきた。また、同時期から消毒や化学物質の毒性について、実態調査や毒性試験を行う事例も大幅に増加してきている³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾。

しかし、調査研究事例数は大幅に増加しているものの、その大半が現地での実態調査か、ラボレベルでの毒性試験であった。そのため、下水処理水の性状と形成される水生生物との関係に関して、影響要因を分離して検討したり、定量的に評価した事例は見られなかった。

2.2 既往の知見と問題点

既往研究のうち、大規模な調査事例として、独立行政法人土木研究所と自治体等との共同研究が挙げられる⁷⁾。これらの調査結果をもとに、下水処理水の性状と水生生物との関係について、主な影響要因と得られた知見を表-1にまとめた。

その結果、定性的な知見は得られつつあるが、実態調査や現地実験を中心として検討している以上、環境条件が均一にならないことや影響要因ごとに条件を制御することが難しいことから、その地点での特性は把握できても、影響要因の定量的かつ一般的な評価は困難であると考えられた。

3. 水路実験

前章で述べたように、既往研究では現地での実態調査や実験が主で、下水処理水が水生生物相に与える影響について、その要因の分離や影響の定量的な把握は困難である。

そこで、屋内において多系列水路を用いた実験を行い、均一な条件で、影響要因を独立して制御することで、水生生物への影響を定量的に比較検討することにした。

具体的には、屋内に実験水路を製作し、下水処理方式や処理水質の異なる下水処理水を流下させる対照実験を行い、水路に形成される水生生物相の差異を把握して、処理水質と水生生物相の関係を検討している。

3.1 実験方法

3.1.1 実験水路

実験水路は、実験施設の屋内に設置することで、自然条件の影響を排除して、実験条件をほぼ均一に保つようにした。実験水路の構造は、長さ2m、幅が50mm及び95mmの2種類のステンレス製水路をそれぞれ6連ずつ設置し、供給水量や流速等の様々な条件に対応できるようにしている。

また、各水路の上流側には付着藻類試験に供する付着板を、下流側には底生生物試験を行うための礫材を設置できるような構造とした。その他、実験用の試験水や薬液を供給するためのポンプ類、生物の成長に欠かせない光量を確保するための照明等で構成される。写真-1に実験水路の写真を示す。

3.1.2 河床材料

(1) 付着藻類用基板

下水処理水中に生息し得る生物のうち、付着藻類及び底生動物の生育状況に重点をおいた分析を行った。

実験水路本体はステンレス製であり、付着藻類が生育する環境としては適切ではない。そこで、付着藻類の生育場所として人工的な基板を水路内に設置することにした。

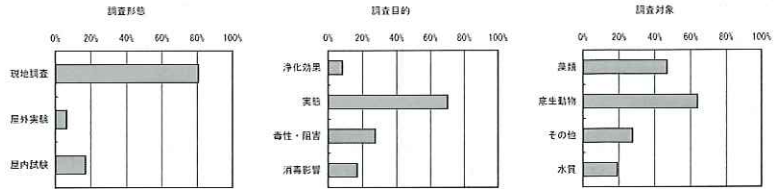


図-1 既往研究事例の分類 (総文献数: 47 件)

表-1 主な影響要因と水生生物との関係

消毒	塩素消毒では特定の緑藻類 (クロロロビオン) が特徴的に生育する。
	塩素消毒と比べてオゾン消毒では水生生物の多様性が高くなる。
	紫外線消毒と比べて塩素消毒では水生生物の多様性が低下する。
栄養塩	栄養塩濃度の高い水域の方が、藻類の生物量が小さくなった (予想と逆転) NP 比と付着藻類優占出現種との関係はみられない。
アンモニア	底生動物種によっては濃度が高くなると水生生物の出現が規制される。
溶存酸素	生物種によって生息する水域の溶存酸素濃度に違いがみられ、生物種毎に必要な溶存酸素レベルを得られる可能性がうかがわれた。 多様性指数や個体数、汚濁指数と DO 濃度の間に明確な関係はみられなかった。
水温	水生昆虫において、種別の適正水温を得られる可能性がうかがえた。 多様性指数や個体数、汚濁指数と水温の間に明確な関係はみられなかった付着藻類については、高温水域では藍藻類が多くなり、低温水域では珪藻類が多くなることがうかがわれた。



写真-1 実験水路

設置する基板としては、付着藻類の定量採取用に通常用いられている素焼きの陶器板を用いることにした。また、大きさは水路幅に合わせて、4.5 × 9cm のものと、9 × 9cm のものの2種類を用意し、各水路ごとに12枚ずつ設置した。

(2) 底生動物用河床材料

実験終了時に底生動物の分析を行い、各実験ケースにおける環境条件毎の底生動物の違いを把握することにした。

そこで、水路内に底生動物の生息空間を構成する必要があることから、水路の下流側区間 (長さ80cm) に礫材を投入して、底生動物等の生息空間を確保した。

礫材の大きさは、水路の寸法から礫の密度と形成される間隙の空間を考慮して、粒径2～3cmの碎石を用いることとし、付着基板とほぼ同じ高さになるように水路の下流側区間に充填した。

3.1.3 実験条件

下水処理水の栄養塩類濃度と、付着藻類及び底生生物との関連性に着目して、実験条件を設定した。

(1) 実験期間

実験時期の気温や水温により、付着藻類の生育状況が異なるため、第1回及び第2回実験は実験期間を2週間、第3回実験は4週間とした。

(2) 対象試験水

水路実験では、以下の3種類の下水処理水を調製して、試験水として用いた。なお、以下の下水処理水に関しては、いずれも消毒処理を行う前のものを用いている。

1) 実下水処理場の高度処理水

処理方式：標準活性汚泥法、嫌気無酸素好気法及び凝集剤添加循環硝化脱窒法による各下水処理水の混合水に、急速砂ろ過処理を施したもの

2) 下水処理実験プラントの二次処理水

処理方式：標準活性汚泥法

3) 下水処理実験プラントの高度処理水

処理方式：嫌気好気法

(3) 水質条件

試験水の水質条件の設定は、以下のとおりとした。なお、一部の試験水は水質を調製するために、実処理場の高度処理水を原水として、人工的に栄養塩を添加している。栄養塩の添加供給方法は、硝酸ナトリウム (NaNO_3 ：分子量 84.99) およびリン酸水素二カリウム (K_2HPO_4 ：分子量 174.18) の高濃度溶液を調製の上、薬液タンクに貯蔵し、定量ポンプで必要量を混合タンクに送り、処理水と攪拌混合することで行った。

第1回および第2回実験は、処理方式による水質の違いに関する比較のほか、下水処理水に段階的に栄養塩を添加して調製することで、栄養塩濃度が高濃度域の場合について、水生生物への影響を検討した。一方、第3回実験は、高度処理水を上水で希釈した試験水をベースに栄養塩濃度を制御することで、栄養塩濃度が比較的低濃度である場合の水生生物への影響について検討を行った。

1) 第1回・第2回実験

水路	下水処理水	調製水質
A	実験プラント 二次処理水	原水のまま
B	実験プラント 高度処理水	原水のまま
C		$\text{NO}_3\text{-N} = 45\text{mg/L}$, $\text{PO}_4\text{-P} = 3.0\text{mg/L}$
D	実下水処理場	$\text{NO}_3\text{-N} = 15\text{mg/L}$, $\text{PO}_4\text{-P} = 1.0\text{mg/L}$
E	高度処理水	$\text{NO}_3\text{-N} = 4.5\text{mg/L}$, $\text{PO}_4\text{-P} = 0.3\text{mg/L}$
F		原水のまま

2) 第3回実験

水路	下水処理水	調製水質
A		$\text{NO}_3\text{-N} = 5\text{mg/L}$, $\text{PO}_4\text{-P} = 0.05\text{mg/L}$
B	実下水処理場	$\text{NO}_3\text{-N} = 5\text{mg/L}$, $\text{PO}_4\text{-P} = 0.1\text{mg/L}$
C	高度処理水の	$\text{NO}_3\text{-N} = 5\text{mg/L}$, $\text{PO}_4\text{-P} = 0.5\text{mg/L}$
D	10倍希釈水	$\text{NO}_3\text{-N} = 2\text{mg/L}$, $\text{PO}_4\text{-P} = 0.5\text{mg/L}$
E		$\text{NO}_3\text{-N} = 1\text{mg/L}$, $\text{PO}_4\text{-P} = 0.5\text{mg/L}$
F1		原水のまま
F2	実下水処理場 高度処理水	原水のまま

(4) 水理条件

各実験における水理条件の設定値は、以下に示すとおりである。

実験	使用水路	流速 (cm/s)	水深 (cm)	供給水量 (L/min/水路)
第1回	5 cm 幅	10	3	9
第2回	9.5cm 幅	10	2	11
第3回	5 cm 幅	10	3	9

* 第3回実験の F 2 水路のみ 10cm 幅

3.1.4 試料採取

(1) 試料採取

前述した条件により、試験水を水路に流下させることで形成された付着藻類及び底生動物を分析定量するため、分析用試料の採取を行った。また、試験水の水質を把握するため、水質分析用試料の採水を併せて行った。

1) 採取間隔

①付着物

生育状況に応じて、週2回程度、分析用試料の採取を行った。

②底生動物

実験終了時に1回採取した。

③水質

週2 - 3回程度、採水を行った。

2) 採取位置

①付着物

水路内における照度のムラや、流下による水理・水質条件の違いの影響を減らすため、上流側、中流側および下流側から、それぞれ一部ずつ採取し、3箇所からの試料をコンポジットしたものを、クロロフィルa及び付着藻類についての分析に供した。

②底生動物

各水路の下流側の礫を全て水路から取りあげてバケツのなかに移し、礫間に生息する生物を洗い落としした。その後、目合い 0.5mm のフルイを用いて生物を選り分け、分析に供した。

③水質

各水路の最上流側で採水を行った。

(2) 試料保存・運搬

採取した付着物試料のうち、3分の1を付着藻類用の分析試料として、3分の2をクロロフィル a の分析用試料として分割した。

さらに、付着藻類および底生動物用の試料はホルマリンを 10% (v/v) になるように添加することで固定し、持ち帰って分析に供した。

また、クロロフィル a 用の試料は、採取後に冷蔵状態で分析室まで搬送し、分析に供した。

水質分析試料に関しては、溶解性項目の試料について、採水後に GF/B ろ紙でろ過を行った。また、窒素・リン分析試料は採水後直ちに硫酸で固定を行った。すべての水質分析試料は保存処理等が終わり次第、冷蔵状態で分析室まで搬送し、分析を行った。

3.1.5 分析

(1) 生物分析

採取試料は、以下の方法で分析を行った。

1) クロロフィル a (Chl-a)

河川水質試験方法 (案)⁸⁾ 58.4.1 による単波長法により測定した。

2) 付着藻類

試料をよく混合した後、全容量を測定し、その後一定量を取って顕微鏡によって観察し、同定及び計数した。生物が多い場合には、全容量を測定した後、その一部を更に希釈してから同定と計数を行った。表記は単位面積当たりの細胞数 (cells/cm²) として表す。

3) 底生動物

泥やゴミ等から生物を分離するソーティングを行った後、実体顕微鏡を用いるなどして観察、同定を行った。また、計数 (定量) には、単位面積あたりの個体数 (個体/m²) として算出した。

(2) 水質分析

採水した試料は、各水質項目毎に以下の方法に基づいて水質分析を行った。

1) COD_{Cr}

HACH 社 DR/2000 分析計を用いた簡易分析法 (JIS 準拠、U.S.EPA 認可) で測定した。

2) 窒素

河川水質試験方法 (案)⁸⁾ 53. に記載の自動分析法及び総和法により測定した。

3) リン

河川水質試験方法 (案)⁸⁾ 54. による自動分析法及びペルオキシ二硫酸カリウム分解吸光度法により測定した。

3.2 実験結果

3.2.1 生物分析

(1) 第 1 回・第 2 回実験

1) 付着藻類

実験開始後数日前後で水路 A の標準活性汚泥法及び水路 B の嫌気好気法の下水処理水を流した水路に糸状体の付着藻類が出現し始め、1 週間を経過すると水路 F の生物処理 + 砂ろ過法による下水処理水及び水路 C-E の栄養塩を添加した下水処理水を流した水路にも糸状藻が繁茂するようになった。

付着物の生物量を表す Chl-a 及び付着藻類の細胞数の分析結果のうち、第 1 回実験での経時変化を図-2 に示す。付着藻類の生育速度については、処理方法による差は見られるものの、栄養塩濃度の影響は確認できない。また、付着藻類の Chl-a や細胞増殖量は、最終的には処理方法や栄養塩濃度と関係は見られず、ほぼ同じレベルであった。

なお、第 2 回実験については、第 1 回実験と同様の傾向が見られた。

2) 底生動物

底生動物の同定分析結果を表-2 に示す。底生動物については、出現した種数は少なく、ヒルやユスリカがほとんどであった。

処理方式に関しては、今回の実験では高度処理水の方が、二次処理水よりも底生動物の種類・量とも多く出現していた。

付着物の Chl-a 及び付着藻類の細胞数について、

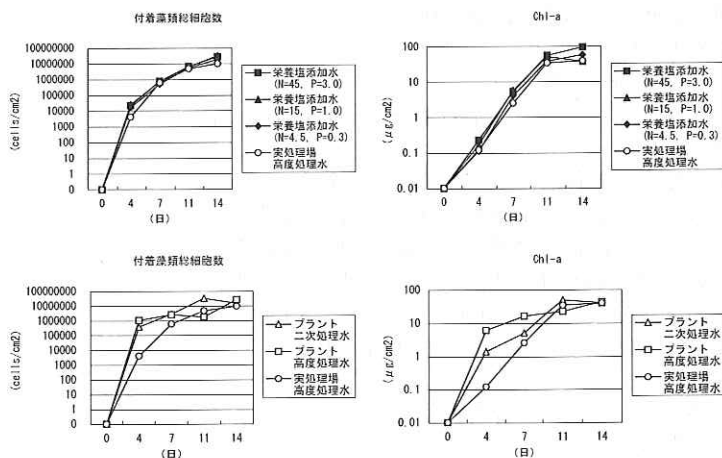


図-2 付着藻類分析結果 (第 1 回実験)

表-2 底生動物分析結果 (第1回実験)

No.	門	綱	目	科	和名	学名	プラント 二次 処理水	プラント 高度 処理水	処理場高度処理水 + 栄養塩添加			処理場 高度 処理水
							原水	原水	N=45 P= 3	N=15 P= 1	N=4.5 P= 0.3	原水
1	へん形動物	ウズムシ			ウズムシ綱	Turbellaria				50		
2	環形動物	ミミズ	ナガミミズ	ミズミミズ	ミズミミズ科	Naididae				125		250
3		ヒル	ウオビル	グロシフォニ	グロシフォニ科	Glossiphoniidae			75	25	125	150
4			咽蛭	イシビル	イシビル科	Erpobdellidae		150		50	25	25
5	節足動物	甲殻	ワラジムシ	ミズムシ	ミズムシ	Asellus hilgendorfi hilgendorfi					25	
6		昆虫	ハエ	チョウバエ	Psychoda 属の一種	Psychoda sp.		75				
7				ユスリカ	ユスリカ属の一種 1	Chironomus sp. 1	50	775	75			50
8					ユスリカ属の一種 2	Chironomus sp. 2		50				
9					クロユスリカ属の一種	Einfeldia sp.			75	25		25
10					ヒゲユスリカ族	Tanytarsini		700			50	
11					ユスリカ亜科	Chironominae		50		50	75	75
12					エリユスリカ亜科	Orthopcladiinae		100				
13					ユスリカ科 蛹	Chironomidae pupa		75		25	25	
14				ミギワバエ	ミギワバエ科	Ephydriidae		25				
15	触手動物	コケムシ	掩喉	ハネコケムシ	ハネコケムシ科	Plumatellidae	*	*	*	*	*	*
種類数							2	10	4	8	7	7
合計 (個体/m ²)							50	2000	225	350	325	575

注：個体数の*は群体で出現したことを示す。

経時変化を図-3に示す。

(2) 第3回実験

第3回実験では、第1回及び第2回実験とは逆に、栄養塩濃度を低濃度で段階的に設定した。

付着物のChl-a及び付着藻類の細胞数について、経時変化を図-3に示す。

その結果、付着藻類の生育速度や最終的なChl-a量及び細胞増殖量は、試験水中の窒素濃度の違いにはほとんど左右されないが、リン濃度による影響が見られた。

3.2.2 水質分析

(1) 水質分析結果

各実験における試験水の平均水質を表-3に示す。

(2) 栄養塩と付着藻類増殖との関連性

各実験における生物分析の結果と試験水中の栄養塩濃度の関係を整理した。各実験期間中における付着藻類のChl-a増殖量及び総細胞数の最大値と試験水の平均栄養塩濃度の関係を、第1回及び第3回実験について、それぞれ図-4及び図-5に示す。

窒素に関しては、各実験とも濃度に依存するような明確な変化は見られなかったが、リンに関しては、第3回実験のような低濃度域では濃度依存

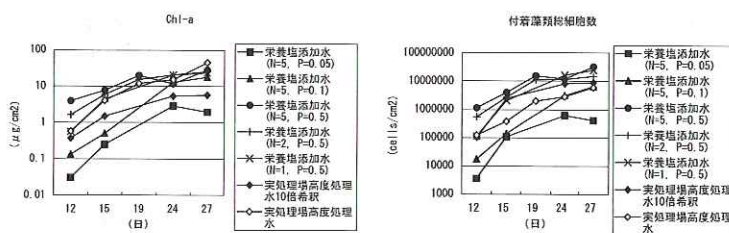


図-3 付着藻類分析結果 (第3回実験)

表-3 実験で用いた試験水の平均水質(mg/L)

第 1 回	水路 A	水路 B	水路 C	水路 D	水路 E	水路 F	
CODcr	27.60	15.60	20.00	18.40	18.60	15.25	
T-N	18.48	7.75	56.17	18.97	6.91	6.86	
NO ₃ -N	16.14	6.07	53.87	17.14	5.33	5.34	
T-P	1.89	0.09	4.56	1.67	0.52	0.18	
PO ₄ -P	1.64	0.02	4.41	1.45	0.45	0.08	
第 2 回	水路 A	水路 B	水路 C	水路 D	水路 E	水路 F	
CODcr	35.00	19.67	7.80	7.20	7.40	7.80	
T-N	17.29	8.05	48.59	18.33	6.17	6.29	
NO ₃ -N	12.22	6.91	45.59	16.69	5.00	5.06	
T-P	1.96	0.13	3.33	1.53	0.59	0.30	
PO ₄ -P	1.59	0.04	3.10	1.42	0.51	0.22	
第 3 回	水路 A	水路 B	水路 C	水路 D	水路 E	水路 F1	水路 F2
CODcr	3.79	3.07	2.50	3.13	2.08	4.07	8.79
T-N	4.44	4.73	4.20	2.08	1.50	1.55	7.03
NO ₃ -N	3.95	4.22	3.52	1.68	1.12	1.15	5.58
T-P	0.06	0.11	0.32	0.31	0.36	0.02	0.12
PO ₄ -P	0.04	0.09	0.31	0.29	0.35	0.01	0.05

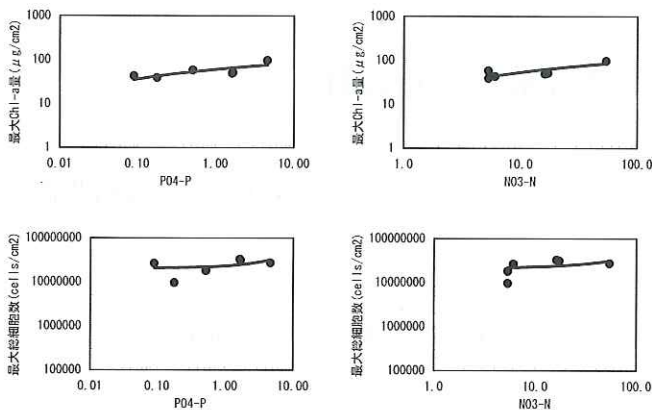


図-4 形成される付着藻類と水質の関係 (第1回実験)

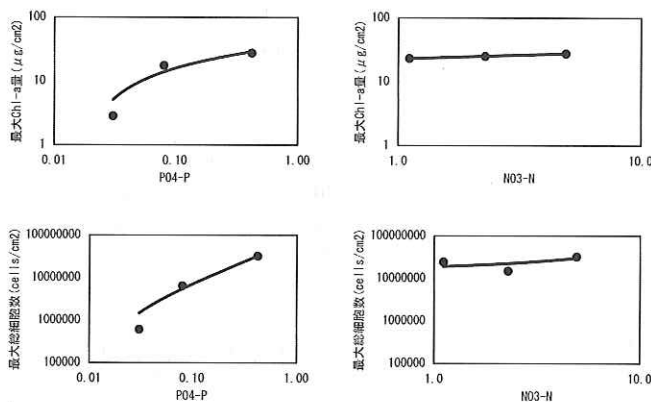


図-5 形成される付着藻類と水質の関係 (第3回実験)

の明確な傾向が見られ、第1回実験での高濃度域では濃度依存の傾向が小さくなっていた。

4. 考察

栄養塩による形成される水生生物相への影響について、付着藻類の増殖にはリン濃度が大きく影響することが示唆された。

その一方で、リンが高濃度の場合は、付着藻類の増殖への寄与度が下がる結果となった。これら

の要因として、栄養塩濃度が一定以上となると、生物が栄養として利用しきれない余剰分となることや、空間的に生物の増殖が限界となったことが推察された。

また、付着藻類の生育速度について、処理方式による違いは見られたものの、栄養塩濃度の影響が見られなかったのは、処理施設や方式の違いによる原水中の含有藻類量の差や、窒素・リン以外の栄養物質の影響等が要因として考えられた。

参考文献

- 1) 国土交通省都市・地域整備局下水道部監修：平成14年 日本下水道、p.223, (社)日本下水道協会, 2002
- 2) 生態系との共生をはかる下水道のあり方検討会編：生態系にやさしい下水道をめざして、技報堂出版, 2001
- 3) 例えば、仁科博之、丸山俊朗、三浦昭雄：都市下水2次処理水の養殖ノリに及ぼす影響について、第20回 下水道研究発表会講演集, pp.486-488, 1983
- 4) 例えば、服部 潔：覆がい下水処理場に発生するユスリカ等水生こん虫の防除について、第22回 下水道研究発表会講演集, pp.58-60, 1985
- 5) 例えば、若林明子ら：清流の復活に関する研究 III 野火止用水の水生生物、東京都環境科学研究所年報, Vol.1987, pp.134-139, 1986
- 6) 例えば、大村達夫：下水道システムに消毒はどこまで必要か、月刊下水道, Vol.21, No.10, pp.24-27, 1998
- 7) (財)下水道新技術推進機構：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, 2001年度 下水道新技術研究所年報, 1/2 巻, pp.137-144, 2002
- 8) 建設省河川局監修：河川水質試験方法 (案) 1997年版, 技報堂出版, 1997

竹歳健治*



国土交通省国土技術政策
総合研究所企画部研究評価・推進課技術管理係長
(前 同 下水道研究部
下水処理研究室研究官)
Kenji TAKETOSHI

中島英一郎**



国土交通省国土技術政策
総合研究所下水道研究部
下水処理研究室長
Hideichiro NAKAJIMA

平出亮輔***



国土交通省国土技術政策
総合研究所下水道研究部
下水処理研究室研究官
Ryosuke HIRAIDE