

下水処理水が水生生物に与える影響の評価

宮本宣博* 玉本博之** 田中宏明***

1. はじめに

下水道整備によって公共用水域の水質汚濁は改善され、生物環境への影響はある程度改善してきたものと考えられる。しかし生態系の保全といった観点からは、まだ課題が多く残されているのが現状であり、公共用水域の水質保全に加え多様な生物が棲めるような、「生態系に配慮した取り組み」が必要となっている。このような背景からハビタット(生息空間)の確保を目的として、多自然型川づくりへの取り組みが近年活発になされているが、ハビタットの形成を図るにあたり水生生態系では、流況や水質も大きな役割を担っている。特に都市域では水資源の再利用に伴い、下水処理水の河川へ占める割合は年々大きくなっており、再利用比率が90%を超えるような河川¹⁾も報告されている。

このため健全な河川環境を考える上で、下水処理水の果たす役割は大変重要であり、ビオトープやせせらぎ水路等の新しい水辺空間を創出するような取り組み²⁾にも利用されている。このような背景から、水生生物と下水処理水の関係を評価することは、生態系に配慮した都市河川を考える上で非常に重要であると考えられる。そこで下水処理水の放流先河川や水路に形成される水生生物群集と、水質の関係について検討を行ったので報告する。

2. 調査概要

調査は、平成8年から12年にかけて全国10ヶ所で行った。調査地点の概要を表-1に示す。

表-1 適用対象処理および水域の概要

処理場名	調査水域	調査期間	処理方式	調査区間へ供給する処理水の消毒方式	処理水量比 (%)
A 処理場	せせらぎ水路	H8~H10	標準活性汚泥法	塩素	100
B 処理場	既存小河川	H12	標準活性汚泥法	塩素	70
C 処理場	既存小河川	H8~H10	嫌気好気活性汚泥法	塩素	80
D 処理場	せせらぎ水路	H8~H10	硝化内脱窒法 + PAC 注入 + 急速ろ過	オゾン	100
E 処理場	せせらぎ水路	H9~H10	標準活性汚泥法 + 急速ろ過	オゾン	100
F 処理場	既存小河川	H12	標準活性汚泥法	塩素	70
G 処理場	ビオトープ	H12	標準活性汚泥法 + 急速ろ過	紫外線	100
H 処理場	せせらぎ水路 冷却池 植生浄化池	H12	凝集剤添加 標準活性汚泥法 + 急速ろ過	なし 紫外線	100
I 処理場	安定性 既存小河川	H9~H11	硝化内脱窒法 + 急速ろ過 + 礫間接触酸化	紫外線 塩素	100 70 90
J 処理場	ビオトープ	H12	標準活性汚泥法	塩素	100

これら下水処理水の放流先である河川、せせらぎ水路、ビオトープ等で形成される水生生物と水質について調査を実施した。なお本報告では、水質汚濁との関係がよく整理されている^{3),4),5),6)} 付着藻類と底生生物に着目して検討を行なった。水質調査項目については、BOD、DOなどの生活環境関連項目および、窒素・リンなどの富栄養化関連項目、合計14項目について分析を行なった。

3. せせらぎ水路に形成される生物相

下水処理水のみが流れるせせらぎ水路を対象として、水質と生物の流下過程の変化を調査した。また付着藻類、底生生物については、以下に示す式から多様性指数(H) (Shannon 指数) を求めた³⁾。

3. せせらぎ水路に形成される生物相

下水処理水のみが流れるせせらぎ水路を対象として、水質と生物の流下過程の変化を調査した。また付着藻類、底生生物については、以下に示す式から多様性指数(H) (Shannon 指数) を求めた³⁾。

多様性指数 (Shannon 指数)

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i \quad (1)$$

S : 種類数

P_i : i 番目の種類の個体数が総個体数に占める割合

Evaluation of the Influence of Treated Wastewater on the Attached Algae and Benthic Animals

多様性指数は生物種の多様性を評価する指数で、各出現種の個体数が均等なほど多様性指数は大きくなり、多様性が高くなることを示している。逆に特定の出現種のみが卓越した場合は、多様性指数は小さくなる。この指数を用いて下水処理水の影響を評価する際、最も留意すべき点は生物群集の質的变化を把握することと考えられる。例えば下水処理水の流入前後で同じ多様性指数が得られたとしても、下水処理水の影響によって最初の生物群集とは異なっている可能性がある。そこで多様性指数だけでなく、優占種や種構成の変化についても充分注意を払う必要がある。そこで優占種の把握を行なうとともに、種構成の変化を把握するため汚濁指数 (Pantle-Buck 法) による評価を合わせて行なった³⁾。

Pantle-Buck 法は、指標生物の出現頻度を考慮した評価方法で、有機汚濁の異なる水域にはそれぞれ特徴的な生物種が出現するという指標生物の出現をベースに算出される。Pantle-Buck 法によって得られた値が低い程、水質階級は清浄であると区分される。

生物汚濁指数 (Pantle-Buck 法)

$$S = \sum (s \times h) / \sum h \quad (2)$$

h : i 番目の種類の個体数が総個体数に占める割合

s : サプロビ階級 (水質汚濁階級)

汚濁指数 (S)

1.0~1.5=汚濁は非常に少ない (貧腐水性)

1.6~2.5=汚濁は中くらい (β 中腐水性)

2.6~3.5=汚濁は強い (α 中腐水性)

3.6~4.0=汚濁は非常に強い (強腐水性)

これらの各指数を用いて、せせらぎ水路における付着藻類、底生生物の流下過程における生物群集の変化を図-1 に示した。

多様性指数について着目すると A 処理場のせせらぎ水路の付着藻類、D 処理場のせせらぎ水路の付着藻類および底生生物は、流下過程に伴い多様性指数が増加傾向にある。これらの水路における多様性の増加の要因として、流下距離による水質変化が考えられるが、D 処理場については流下過程で水質の大きな変化は確認できなかった。A 処理場については、残留塩素濃度が流下過程に伴い

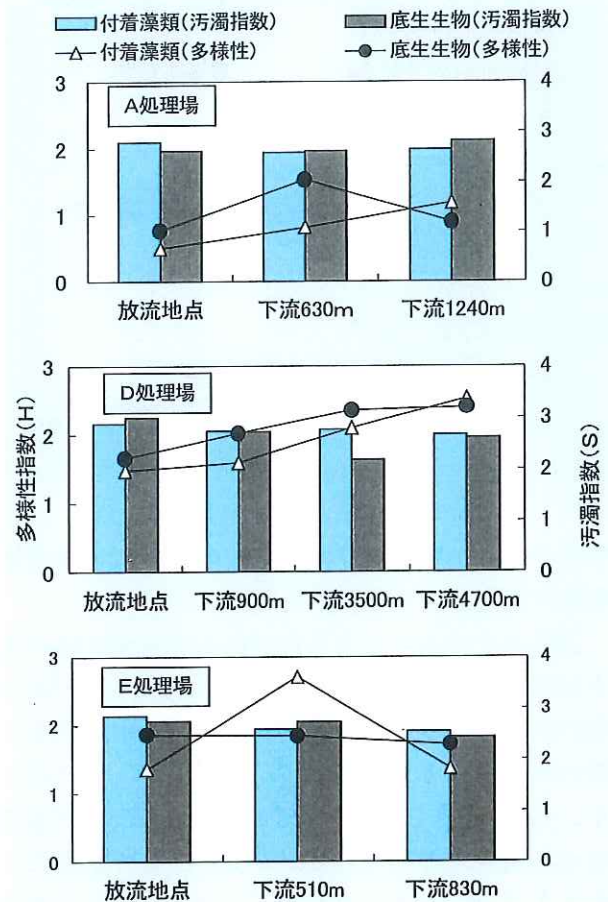


図-1 せせらぎ水路における多様性指数・汚濁指数の変化
減少していたことから、残留塩素による生物群集への影響が示唆された。A 処理場のせせらぎ水路における付着藻類の優占種は、放流地点では塩素処理を行なっている下水処理場の放流水路等で良く見られる *Chlorolobion* (クロロピオン) 属が特異的に優占しており、流下に伴い本種の出現量は減少傾向を示した。このような変化から付着藻類への影響因子として残留塩素の影響が大きいことが考えられた。しかしこのような個別の種に対して見られた変化は、汚濁指数には反映しなかった。また E 処理場のように多様性指数についても変化が見られないケースも確認された。これらの違いは、付着藻類や底生生物の多様性が一つの要因によって支配されていないことを示すものであり、これらの複合的な要因について、注意深く検討を行なう必要があるものと考えられる。

4. 紫外線消毒に伴う付着藻類群集の変化

A 処理場では残留塩素の影響によってせせらぎ水路の付着生物の優占種が変化していることを示した。そこで実際に塩素消毒と、紫外線消毒を行

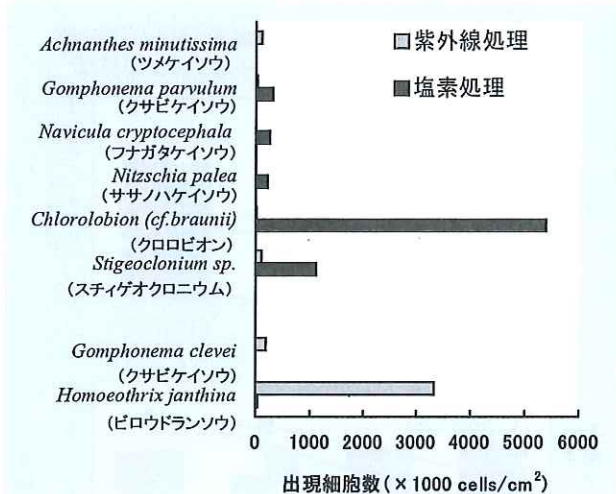


図-2 消毒法の違いによる付着藻類の変化

なっている I 処理場で消毒方法の違いによる生物群集の変化について検討を行なった。

消毒方法の違いによる代表的な付着藻類種の変化を図-2 に示すが、塩素消毒時には図中の上段 5 種に代表されるような塩素耐性、汚濁耐性をもつ種の出現量が多く、特に *Chlorolobion* (クロロピオン) 属が優占していた。このような傾向は下水処理水の放流先で出現していた報告として福島らの報告⁴⁾ と良く一致していた。一方、紫外線消毒時には *Homoeothrix janthina* (ピロウドラソウ) や *Gomphonema clevei* (クサビケイソウ) などの河川で普通に確認できる種の増加が顕著であり、特に *H. janthina* は調査期間を通じて、ほぼ優占種とであった。また調査期間を通じて見られた種数は、塩素消毒の系列では 37 種であったが、紫外線消毒の系列では 56 種に増加するなど消毒方法の変更によって付着藻類群集の変化が確認された。

5. オゾン消毒による底生生物の変化

消毒方法を塩素消毒からオゾン消毒に変更した際に形成される、底生生物群集の変化について D 処理場で行なった実験例を示す。D 処理場は平成 8 年 1 月に塩素消毒からオゾン消毒に変更した。図-3 にオゾン消毒に切り換えた後の底生生物の変化を示す。1 月の調査結果はオゾン消毒に切り換えて 1 週間後の調査で、この結果は塩素消毒の影響を反映した底生生物群集である。調査開始時にはピロウドイシビル (*Erpobdella testacea*) を優占種とした僅か 4 種だけの種構成であったが、時間の経過に伴い、ピロウドイシビルの出現量は減少し、サホコカゲロウ (*Baetis sahoensis*) やコガタ

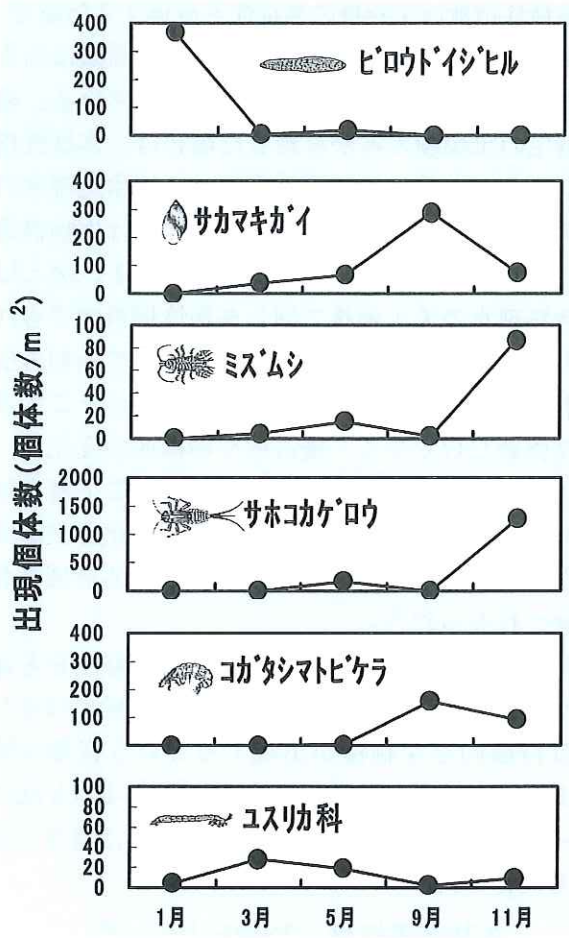


図-3 オゾン処理変更後の底生生物の変化

シマトビケラ (*Cheumatopsyche brevilineata*) などの、河川でもよく見られる種の出現が確認された。またオゾン消毒に変更した後の多様性指数は 0.14 から 1.7 となり、塩素消毒からオゾン消毒に変更したことにより、底生生物群集の多様性が高まっていることが確認された。

6. 放流先河川における生物相の変化

下水処理水を河川に放流した際に、形成される生物群集を調査した事例として、B 処理場と F 処理場の事例を示す。下水処理水の放流に伴う水質変化として BOD の変化を図-4 に示した。B 処理場の放流先河川の水質は良好で、調査時の BOD の平均は 1.3mg/L であった。このため下水処理水の流入によって河川の BOD 濃度は悪化した。一方、F 処理場については、市街地を通過する小河川に放流しており、下水処理水の流入による BOD の変化は、殆ど確認できない。むしろ雑排水の流入する下流地点で、BOD が上昇することがあった。

下水処理水の流入に伴う付着藻類の変化を図-5 に示す。B 処理場の上流では貧腐水性 (*Os*) の指標

種の占める割合が約6割を占めていたが、放流後では α 中腐水性(αm)、強腐水性(P_s)の指標種の占める割合が高くなり、下水処理水の流入によって

河川の付着藻類群集は、有機汚濁に耐性のある種構成に変化していることが確認された。また季節的な変化としては、9月の調査結果は他の調査時期と若干異なった傾向であるが、河川流量が多かったため下水処理水の相対的な影響が抑えられていたことが要因として考えられる。一方、F処理場のケースでは、下水処理水が流入した後の下流地点は、1月調査では貧腐水性指標種から β 中腐水性(βm)指標種に変化する傾向が確認されたものの、全体としては下水処理水の放流による付着藻類群集の変化は明瞭ではなかった。

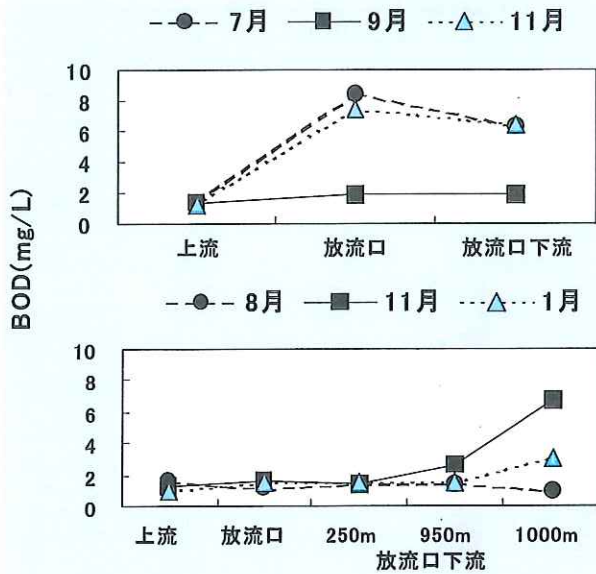


図-4 下水処理水の流入による BOD の変化

図-6 に下水処理水流入に伴う底生生物の変化を示すが、B 処理場では付着藻類ほど明瞭ではないが、貧腐水性の指標種が減少する傾向が確認された。しかし F 処理場については、下水処理水の放流による底生生物の変化は確認できなかった。このように付着藻類、底生生物は放流先の河川の水質状況や流量比によって明瞭な変化が見られるケースとそうでないケースがあることが確認された。

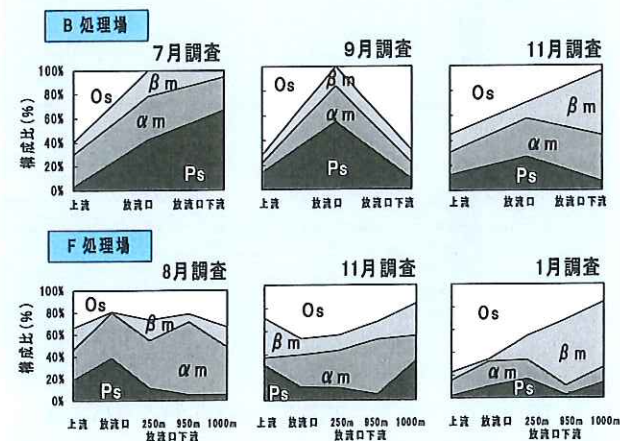


図-5 付着藻類の汚濁階級別構成比の変化

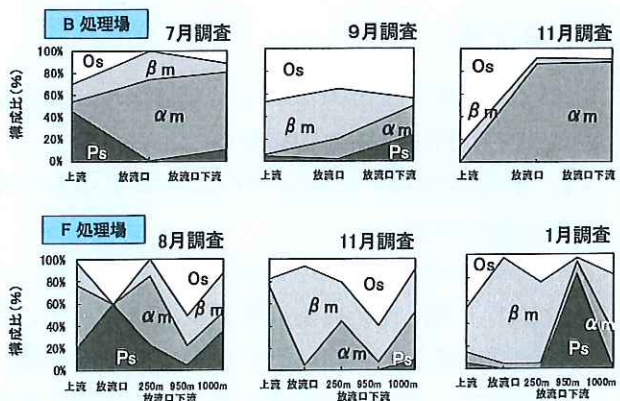


図-6 底生生物の汚濁階級別構成比の変化

そこで生物群集の変化が明瞭に見られた、B 処理場の調査結果を用いて、各調査地点の生物群集の類似度をクラスター分析を用いて評価した。クラスター分析は変数間に意味のあるクラスター(まとまり)を見つけ出そうとする多変量解析のひとつであり、項目間の相対的な類似性を、距離と分岐によって樹形図し、視覚的な把握ができる特徴をもっている。各調査地点の生物群集のクラスター分析結果を図-7 に示す。この結果から示されることとして、付着藻類群集は調査地点による相違より、季節的な影響を強く受けている可能性があることが示唆される。汚濁指標種の変化を合わせて考えると、付着藻類群集の変化を与える因子は季節、水質要因が重要であることが伺える。一方、底生生物のクラスター解析結果では、季節的な違いよりも、地点の違いによって分けられることが確認できた。今回調査を行なったこれらの地点間の河床材料等を考慮しても、B 処理場のケースでは底生生物群集の変化要因として、季節による影響より、水質による影響が大きいことが伺えた。

7. 毒性物質による底生生物への影響

底生生物に影響を与える直接的な要因とし

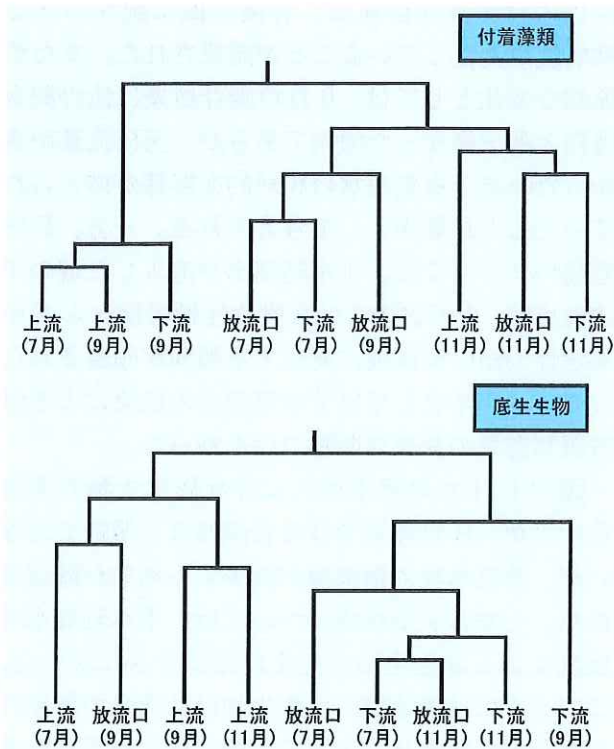


図-7 付着藻類・底生生物のクラスター樹形図

て、毒性物質が挙げられる。下水処理水に含まれる代表的な毒性物質として、残留塩素や分子アンモニア、亜硝酸、重金属等が挙げられるが、このうち分子アンモニアと残留塩素は生物への毒性が高いことが知られている。今回の調査では残留塩素の検出頻度が低かったため、分子アンモニアと底生生物の出現状況について全調査結果を基にその関係を整理した。なお分子アンモニア濃度は、アンモニウム態窒素濃度と pH、水温から分子アンモニア算出した。

その結果、分子アンモニアが検出されている地点で見られる生物は、イトミミズやユスリカを中心とした強腐水性の種であった。河川における主要な構成生物であるカゲロウやトビケラは、分子アンモニアの濃度が上昇するにつれ、殆ど確認されていない。唯一検出されている地点は、分子アンモニア濃度が採水時期に一時的に高かったことが原因と考えられ、生物との関係を整理するための水質データとしては、採水方法に課題が残る結果となった。またここで示された分子アンモニアに耐性を持つ生物種は、放流水に塩素処理を行なった時に見られる種とよく対応していた。塩素消毒時にアンモニア濃度が高い場合は、塩素注入率が高くなるため、今回残留塩素が殆ど検出されなかった地点についても、分子アンモニアと

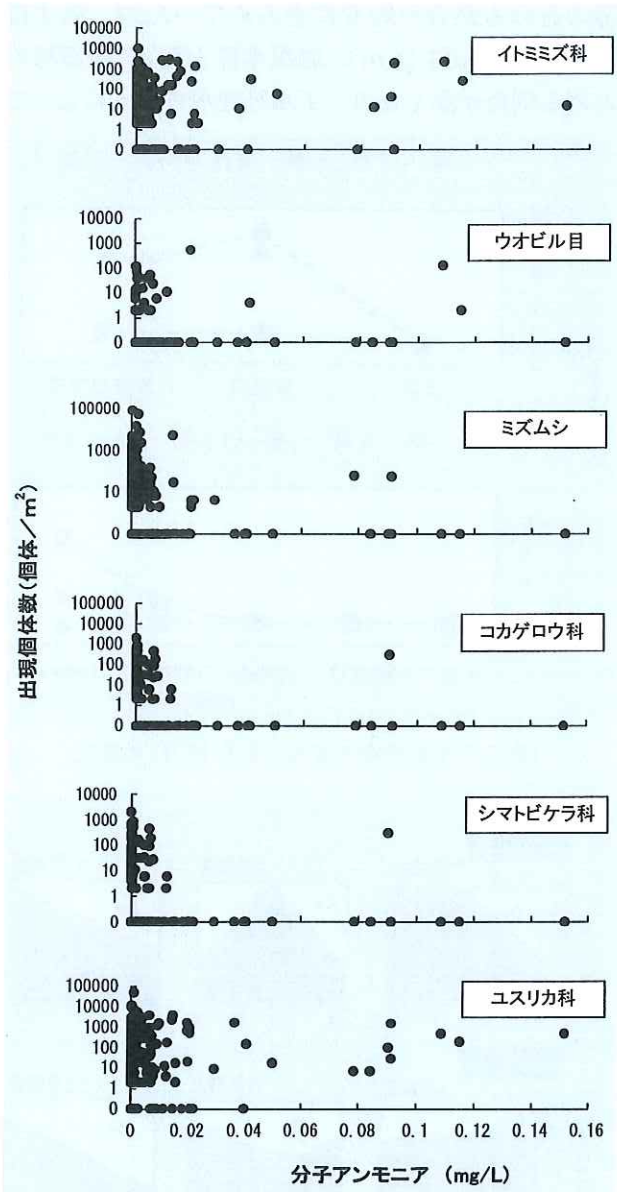


図-8 分子アンモニア濃度と底生生物の現出状況併せて、残留塩素についても引き続き水生生物との関係を調査・検討を行なう必要があると思われる。

8. まとめ

下水処理水が水生生物に与える影響の評価を試みた。その結果以下の知見を得た。

(1) 下水処理水の放流先河川における水質と水生生物の関係

放流先河川の水生生物の変化を評価した。その結果、放流先の河川の水質状況によって、水生生物群集の変化が区別された。これらの違いは処理水と河川水の流量比や、放流河川の水質に依存しているものと推測された。また放流先の河川で明瞭な生物変化が確認されたB処理場

について、クラスター分析を行ない、生物群集の類似度の比較を行なった。その結果、底生生物については地点による影響が大きい、付着藻類群集は、季節的な要因が大きいことが示された。この結果と指標生物の変化を併せて考えると、下水処理水の放流先河川で構成される付着藻類群集は、水質と季節(水温)によって変化していることが推測された。

(2) 消毒方法の違いによる生物群集への影響

消毒方法の変更による生物群集の変化について検討を行なった。その結果、紫外線消毒を行なうと、付着藻類は塩素耐性の強い藻類が減少し、河川で普通に見られるような藻類が多く出現し、多様性指数も増加した。またオゾン処理を行なった場合、底生生物はカゲロウやトビケラなど塩素処理時には出現しなかった種の出現が確認できた。これらの消毒工程の変更によって付着藻類、底生物ともに生物の多様性が高まる結果が得られた。

(3) 分子アンモニアと水生生物の関係

生物相実態調査結果を基にして分子アンモニアと底生生物の関係を整理した。その結果、分子アンモニア濃度によって種の出現状況が異なっていることが示された。しかし他の物質の関与についても否定できないため、これら毒性物質と水生生物との関係についてさらに検討を進める必要があるものと考えられる。

謝辞

本報は「生態系と共生をはかる下水道のあり方検討会」で実施された調査結果を基に作成したものである。財団法人 下水道新技術推進機構及び関係自治体のご協力に感謝いたします。

参考文献

- 1) 多摩川・荒川等流域別下水道整備計画策定調査：東京都下水道局ホームページ,
<http://www.gesui.metro.tokyo.jp/data/fmap07-1.jpg>
- 2) 生態系との共生をはかる下水道のあり方検討会：生態系にやさしい下水道をめざして、技報堂出版, 2001.
- 3) 日本生態学会環境問題専門委員会編：環境と指標生物 2 -水界編-, 共立出版, 1975.
- 4) 森下郁子：指標生物学 生物モニタリングの考え方, 山海堂, 1986.
- 5) 社団法人日本の水をきれいにする会：水生生物相調査解析結果報告書, 1980.
- 6) 津田松苗：汚水生物学, 北隆館, 1964.
- 7) 福島悟：下水処理水による都市河川の生物生息環境の回復-付着藻類群集-, 用水と排水, Vol.37, No.8, pp.643-647, 1995.

宮本宣博*



独立行政法人土木研究所水循環
研究グループ水質チーム
交流研究員
Norihiro MIYAMOTO

玉本博之**



同 水循環研究グループ
水質チーム研究員
Hiroyuki TAMAMOTO

田中宏明***



同 水循環研究グループ
水質チーム上席研究員
Hiroaki TANAKA