

1. 生態系の観点からみた下水再生システムのあり方に関する研究

下水処理研究室 室長 南山 瑞彦
研究官 荒谷 裕介
研究官 平出 亮輔

1. はじめに

下水道の普及に伴って下水処理水の量も増加し、平成 15 年度で年間約 137 億 m^3 の処理水が日本全国の下水処理場から放流されるに至り¹⁾、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。また、都市部においては、都市化の過程で失われた水との触れ合いの場を再生・創出するために、下水処理水を積極的に活用することによってせせらぎ等の水辺環境を整備する事例が増えている²⁾。

河川やせせらぎ等の水辺環境は、様々な水生生物が生息する貴重な空間として位置づけられることから、下水処理水の性状が水生生物に影響を及ぼすと考えられる。しかし、これらの水辺環境に生息する水生生物と下水処理水の性状との関係については明確になっていないのが現状である。

これまで、下水処理水の栄養塩類濃度および全残留塩素濃度の違いが付着藻類相に及ぼす影響に関する室内水路実験を行い、1)硝酸性窒素(NO_3-N)濃度が 1.1~43mg/L の濃度範囲においては、付着藻類生物量との関係は認められない、2)リン酸態リン(PO_4-P)濃度が 0.04~0.09mg/L の濃度範囲において、 PO_4-P 濃度が高くなるにつれて付着藻類生物量が増加するとともに緑藻類が優占する傾向を示す、3)全残留塩素(Total Residual Chlorine : 以下、TRC)濃度が 0.07~5.8mg/L の濃度範囲において、TRC 濃度が高くなるにつれて付着藻類生物量は減少する、との知見を得ている³⁾。

本調査は、下水処理水の残留塩素濃度が魚類に及ぼす影響を把握することを目的とした室内水槽実験を行うとともに、水温および PO_4-P 濃度が付着藻類に及ぼす影響を把握することを目的とした室内水路実験を行った。

2. 調査方法

2.1. 残留塩素濃度が魚類に及ぼす影響に関する室内水槽実験

茨城県霞ヶ浦浄化センター内の実験施設（湖北総合実験施設）に水槽を設置し、残留塩素濃度の違いが魚類に及ぼす影響に関する実験を行った。実験に当たっては、文献に記載の方法を参照した⁴⁾。残留塩素は、全残留塩素(TRC)濃度および遊離残留塩素(Free Residual Chlorine : 以下、FRC)濃度で評価することとした。供試魚は淡水魚の金魚(*Carassius auratus var.*)を使用した。実験回数は 4 回、1 回当たりの実験期間は 5 日間であり、実験開始 24 時間、48 時間、72 時間および 96 時間後の死魚数を記録した。生死の判定は、1)呼吸のない状態で浮遊若しくは沈降している、2)外部からの刺激に反応しない、ことによった。

2.1.1. 装置の概要

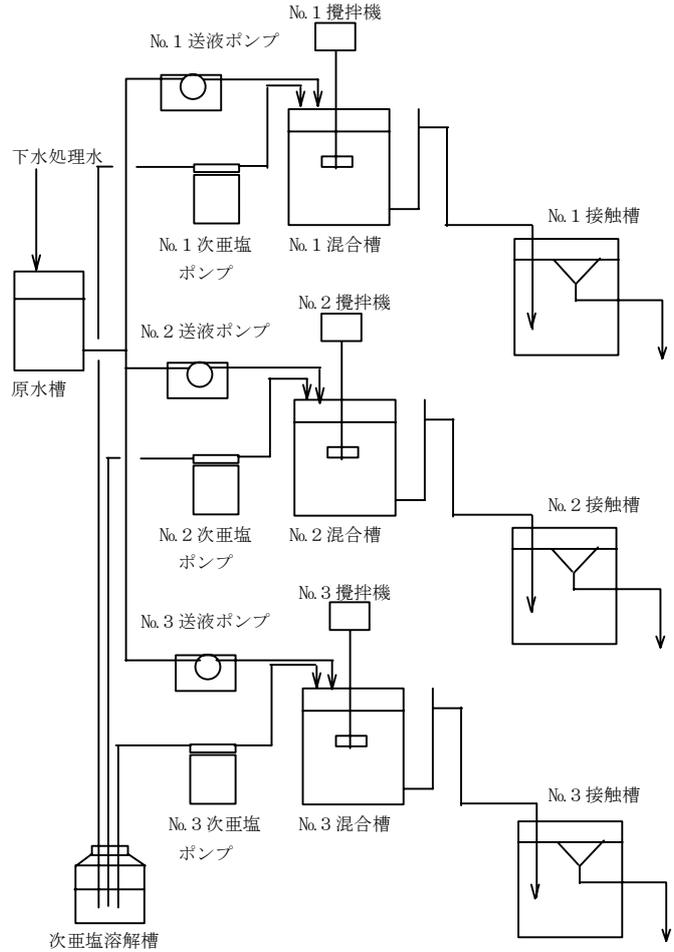
室内水槽実験装置の概略図を図-1 に示す。装置は、原水槽、薬品溶解槽、薬品および原水供給ポンプ、薬品混合槽および塩素接触槽（径 ϕ 375mm×高さ H500mm、実効容量 40L）で構成されており、3 段階の水質レベルを設定することが可能な装備となっている。実験は、一定濃度の試験水を連続的に供給する流水式で行い、接触槽内の滞留時間は送水装置の能力等から 100 分とした。

2.1.2. 水質設定

実験施設が設置されている浄化センターから未消毒の高度処理水（凝集剤添加活性汚泥法、嫌気－無酸素－好気法、凝集剤併用型循環式硝化脱窒法が混合された後に急速ろ過）を各混合槽に導水し、高濃度の次亜塩素酸ナトリウム溶液を定量ポンプで各混合槽に供給して処理水と混合攪拌することによって残留塩素濃度が異なる試水を調整したうえで各水槽に供給した（図－1）。実験は、1 回当たり 3 段階の残留塩素濃度を設定し、設定濃度を変更して合計 4 回実施した。各実験における供試原水の水質を表－1 に、各濃度の水温、pH、DO および残留塩素濃度を表－2 にそれぞれ示す。

2.1.3. 供試魚

金魚は購入魚を使用した。入手した供試魚は、実験に供するまでの一定期間、未消毒の高度処理水で飼育した。実験に際しては、1 回当たり 30 尾の供試魚の全長および体重を測定し、魚体密度が均等になるように選定したうえで 10 尾ずつ各槽に配して実験に供した⁴⁾。供試魚の全長および体重を表－3 に示す。



図－1 室内水槽実験装置概略図

表－1 供試原水の水質

Run No.	BOD	TOC	T-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	NO ₂ -N	T-P	PO ₄ -P	S ₂ O ₂
I	7.0 × 10 ⁻¹	2.4	4.9	6.0 × 10 ⁻³	3.9	4.8 × 10 ⁻²	7.1 × 10 ⁻¹	6.6 × 10 ⁻¹	1.1 × 10 ¹
II	1.5	3.5	7.8	5.0 × 10 ⁻²	6.5	3.4 × 10 ⁻²	6.4 × 10 ⁻¹	5.5 × 10 ⁻¹	1.4 × 10 ¹
III	2.2	3.6	6.7	1.5 × 10 ⁻²	6.0	5.5 × 10 ⁻²	2.4 × 10 ⁻²	5.1 × 10 ⁻¹	1.4 × 10 ¹
IV	6.1 × 10 ⁻¹	5.6	7.7	2.8 × 10 ⁻²	6.6	4.2 × 10 ⁻²	2.9 × 10 ⁻¹	2.3 × 10 ⁻¹	1.1 × 10 ¹

表－2 実験条件（実験期間平均値）

Run No.	系列	水温 °C	pH	DO (mg/L)	全残留塩素濃度 (mg/L)	遊離残留塩素濃度 (mg/L)
I	1	23	7.5	3.1	1.1	9.1 × 10 ⁻¹
	2	22	7.5	3.1	4.5 × 10 ⁻¹	1.4 × 10 ⁻¹
	3	22	7.4	2.9	9.4 × 10 ⁻²	3.8 × 10 ⁻²
II	1	21	7.5	2.9	4.1 × 10 ⁻¹	1.2 × 10 ⁻¹
	2	21	7.6	2.8	3.5 × 10 ⁻¹	8.3 × 10 ⁻²
	3	21	7.5	2.8	3.1 × 10 ⁻¹	7.6 × 10 ⁻²
III	1	19	7.7	2.7	5.0 × 10 ⁻¹	1.7 × 10 ⁻¹
	2	20	7.7	2.8	4.4 × 10 ⁻¹	1.9 × 10 ⁻¹
	3	20	7.7	2.8	4.0 × 10 ⁻¹	1.4 × 10 ⁻¹
IV	1	15	7.5	4.9	5.0 × 10 ⁻¹	2.2 × 10 ⁻¹
	2	15	7.4	4.8	4.3 × 10 ⁻¹	1.7 × 10 ⁻¹
	3	15	7.4	4.9	4.1 × 10 ⁻¹	1.8 × 10 ⁻¹

表－3 供試魚の全長および体重（10尾平均値）

Run No.	系列	全長 (mm)	体重 (g)
I	1	69	4.8
	2	73	6.2
	3	68	5.0
II	1	69	5.2
	2	67	4.5
	3	63	4.1
III	1	69	5.5
	2	71	4.8
	3	61	4.0
IV	1	56	2.8
	2	57	2.7
	3	56	2.2

2.1.4. 分析

分析項目は、生物学的酸素要求量(BOD)、有機性炭素(TOC)、窒素化合物(T-N,NO₃-N,NO₂-N,NH₄-N)、リン化合物(T-P,PO₄-P)、水温、pH、溶存酸素(DO)、残留塩素濃度である。

BOD は、河川水質試験方法（案）⁵⁾⁹.に記載の一般希釈法により測定した。

TOC は、河川水質試験方法（案）⁵⁾⁵⁵.に記載の燃焼酸化-赤外線分析法により測定した。

窒素化合物(T-N,NO₃-N,NO₂-N,NH₄-N)は、河川水質試験方法（案）⁵⁾⁵³.に記載の自動分析法およびペルオキシ二硫酸カリウム分解-銅・カドミウムカラム還元法により測定した。

リン化合物(T-P,PO₄-P)は、河川水質試験方法（案）⁵⁾⁵⁴.に記載の自動分析法およ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。

水温および pH は、横河電機製パーソナル pH メーターMODEL PH82 を用いたガラス電極法により測定した。

DO は、堀場製作所製 PH/DO METERD-55 を用いた隔膜式ガルバニ電池法により測定した。

残留塩素は、HACH 社製 DR/700 COLORIMETER を用いた DPD 法により測定した。

2.2. 下水処理水の水温および PO₄-P 濃度が付着藻類に及ぼす影響に関する室内水路実験

湖北総合実験施設に設置してある実験水路を用いて、水温および PO₄-P 濃度の違いが付着藻類に及ぼす影響に関する実験を行った。

2.2.1. 装置の概要

実験装置の概略図を図-2 に示す。装置は、恒温槽 2 槽、幅 5cm、長さ 120cm の水路 6 系列、および薬品混合槽 4 槽で構成され、恒温槽によって水温条件を、また、薬品混合槽によって水質条件をそれぞれ変化さ

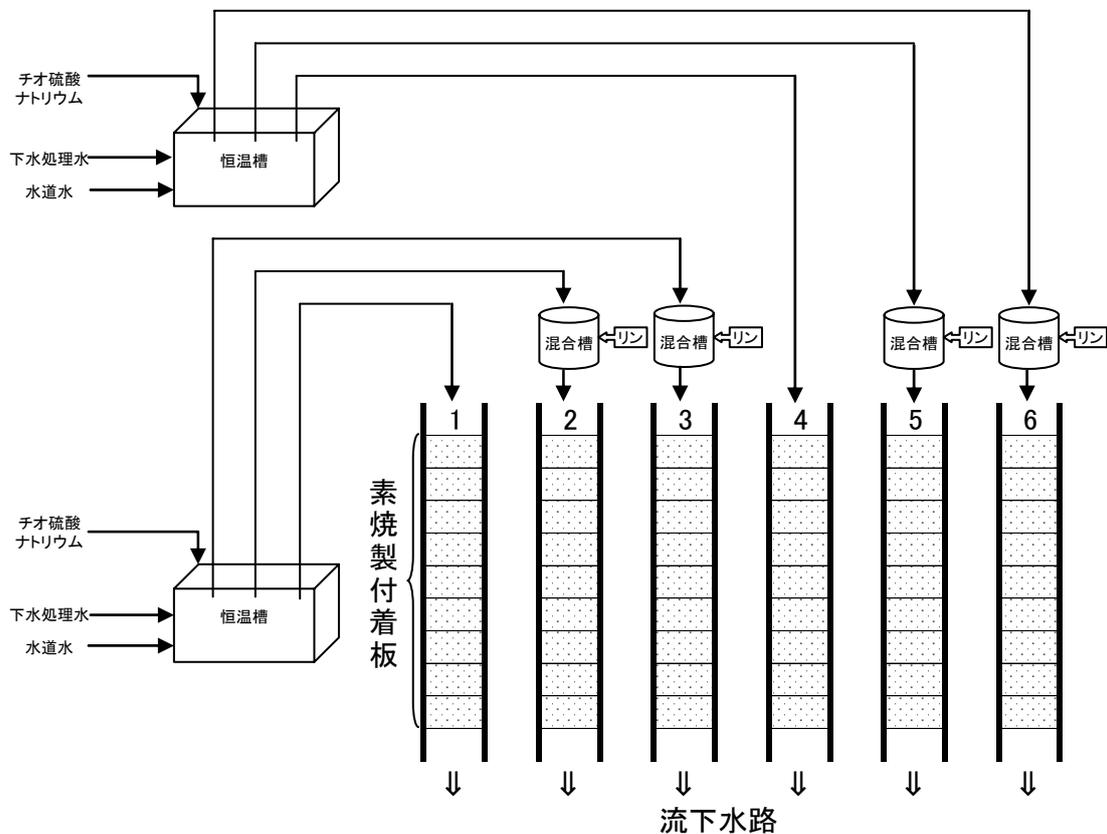


図-2 水路実験概略図

せることが可能な装備となっている。水路における水深、流速および照度を表-4 に示す。水深および流速は、送水装置の能力等を考慮して設定した。照度は、人工照明によって明：暗=12h：12h に設定した。各水路の底部には、付着基板として素焼き製の板(1枚 4.5cm×9cm)を12枚ずつ敷き、この板に付着して生育した藻類をブラシで採取し、分析試料とした。

2.2.2. 水温および水質設定

実験施設が設置されている浄化センターから未消毒の高度処理水を各恒温槽に導水し、処理水の栄養塩類濃度を希釈する目的で水道水(処理水：水道水=1：9)を、また、水道水に含まれる塩素を中和する目的でチオ硫酸ナトリウムをそれぞれ加えたうえで設定温度まで加温した。さらに、各系列前段にある混合槽でリン酸水素二カリウムを加えて、水温および栄養塩類濃度が異なる試験水を調製したうえで各水路へ供給した(図-2)。下水処理水の水質を表-5 に、設定した水温および PO₄-P 濃度を表-6 にそれぞれ示す。

表-4 水理および光条件

水深 (cm)	2.7
流速 (cm/s)	8.4
照度 (lx)	6,800

表-5 下水処理水の水質
(実験期間平均値)

水温	°C	13
BOD	mg/L	1.4
TOC	mg/L	3.2
T-N	mg/L	1.2
NH ₄ -N	mg/L	2.1 × 10 ⁻²
NO ₂ -N	mg/L	3.7 × 10 ⁻²
NO ₃ -N	mg/L	8.5 × 10 ⁻¹
T-P	mg/L	4.6 × 10 ⁻¹
PO ₄ -P	mg/L	4.5 × 10 ⁻¹

表-6 設定水温および濃度 (実験期間平均値)

系列	1	2	3	4	5	6
水温	低			高		
PO ₄ -P濃度レベル	低	中	高	低	中	高
水温 °C	11			15		
PO ₄ -P mg/L	3.1 × 10 ⁻²	1.1 × 10 ⁻¹	1.1	1.4 × 10 ⁻²	8.9 × 10 ⁻²	1.3

2.2.3. 分析

実験水路に素焼き製の付着板をサンプリング回数分設置し、1週間おきに付着板を回収して付着藻類を採取するとともに、水質分析用サンプルも併せて採取した。

分析項目として、BOD、TOC、窒素化合物(T-N,NO₃-N,NO₂-N,NH₄-N)、リン化合物(T-P,PO₄-P)、シリカ(SiO₂)、流速、照度、クロロフィル a (Chl-a)について分析を行った。

BOD、TOC、窒素化合物、リン化合物については、2.1.4.と同様の方法により測定した。

SiO₂は、河川水質試験法(案)⁵⁾⁴⁹.に記載のモリブデン青吸光光度法により測定した。

流速は、KENEK社製 VE10 を用いた電磁式により測定した。

照度は、DeltaOHM社製照度計 DO9721 を用いて測定した。

Chl-aは、河川水質試験法(案)⁵⁾⁵⁸.に記載の三波長吸光光度法により測定した。

3. 調査結果および考察

3.1. 残留塩素濃度が魚類に及ぼす影響に関する室内水槽実験

実験開始96時間後における TRC および FRC 濃度(mg/L)と金魚死亡率(%)の関係を図-3 および図-4 にそれぞれ示す。なお、死亡率(%)は死魚数/供試魚数(1槽当たり10尾)×100で算定した。TRC濃度を0.094~1.1mg/L、FRC濃度を0.038~0.91mg/Lの濃度範囲で変化させて、金魚の生息状況を観察した結果、TRC濃度が0.4~1.1mg/L、FRC濃度が0.12~0.91mg/Lの濃度範囲において、濃度が高くなるにつれて金魚の死亡率が上昇する結果となった。

TRC濃度0.45mg/L、FRC濃度0.14mg/Lのケース(2回目、系列2)において死亡率が100%となり、他の

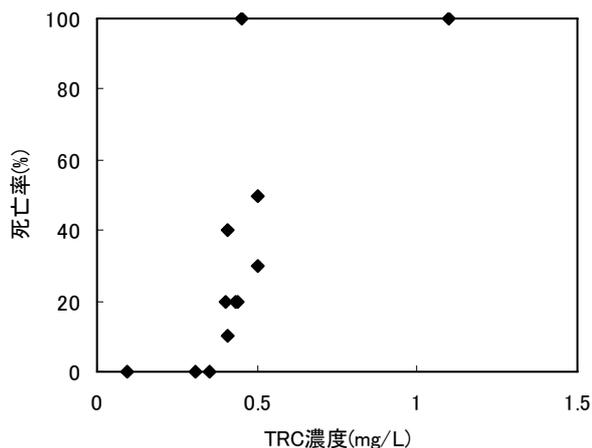


図-3 TRC 濃度と金魚死亡率の関係

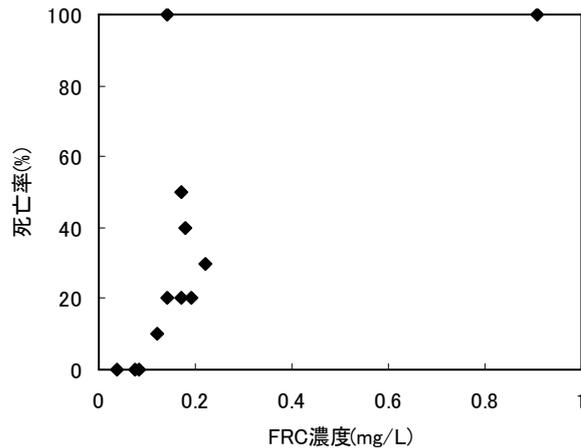


図-4 FRC 濃度と金魚死亡率の関係

ケースに比べて高い傾向を示した。原因としては、実験期間中の残留塩素の微妙な変化等が考えられるが、TRC 濃度 0.4mg/L 以上、FRC 濃度 0.12mg/L の濃度範囲は、残留塩素の僅かな変化が金魚の生息に大きな影響を及ぼす濃度域であると推察される。

下水処理水は、放流先水域における衛生的な安全性を高める目的で消毒が行われており、消毒方法として塩素消毒が多く、下水処理場で採用されている。塩素消毒された下水処理水に含まれる残留塩素の水生生物に対する毒性は一般的に認識されており、今回行った実験からも金魚に対する毒性が認められる濃度域が確認された。

塩素消毒された下水処理水を再生水としてせせらぎ等に活用する場合、衛生的安全性の確保と水生生物の保全の両立が課題となっている。親水用水の残留塩素に関する管理目標値は FRC 濃度で 0.1mg/L 以上を確保することとなっている⁶⁾が、今回の実験において、FRC 濃度 0.12mg/L 以上で金魚の死亡率が増加傾向を示したことを考えると、その両立は難しいものと推察される。したがって、放流域の生態系を保全する観点から塩素消毒の水生生物への影響をなくすことが優先される場合は、塩素を中和することによって毒性を低減させる、他の消毒方法に変更する等を検討する必要がある。

3.2. 下水処理水の水温および PO₄-P 濃度が付着藻類に及ぼす影響に関する室内水路実験

藻類の増殖に影響を及ぼす環境因子の一つに温度（水温）がある。温度は生体反応の進行を律する因子であり、藻細胞の増殖は細胞内で進行する生体反応の総合的結果であるから、生体反応のもつ温度特性を反映した温度依存性を示すこととなる⁷⁾。

藻類の温度に対する反応はふつうの生物の場合と同様で、栄養が十分にある条件下では最適温度に達するまでは温度上昇にしたがって増殖速度が高まり、それ以上になると低下する。一方、栄養制限下における温度に対する反応は、藻類の種類ごとに異なり、また極めて複雑な問題である⁸⁾。

水温を 11℃および 15℃の 2 段階、PO₄-P 濃度レベルを 0.014~1.3mg/L の濃度範囲において 3 段階それぞれ設定して行った今回の水路実験においては、水温が高い場合に、PO₄-P 濃度が藻類の増殖速度により強い影響を及ぼす傾向を示した（図-5）。設定した PO₄-P 濃度レベル全てにおいて、水温の高い場合のほうが生物量の多い結果になったことを考えると、今回設定した水温および濃度範囲においては、水温の違いが付着藻類の増殖に、より大きな影響を及ぼしたものと推察される。

栄養塩類濃度および水温が一般的な河川水に比べて高い下水処理水を河川等に放流する場合、栄養塩類濃度に加えて水温が放流先水生生物に大きな影響を及ぼす可能性があることを認識するとともに、その影響を低減するための対策を講ずる必要がある。

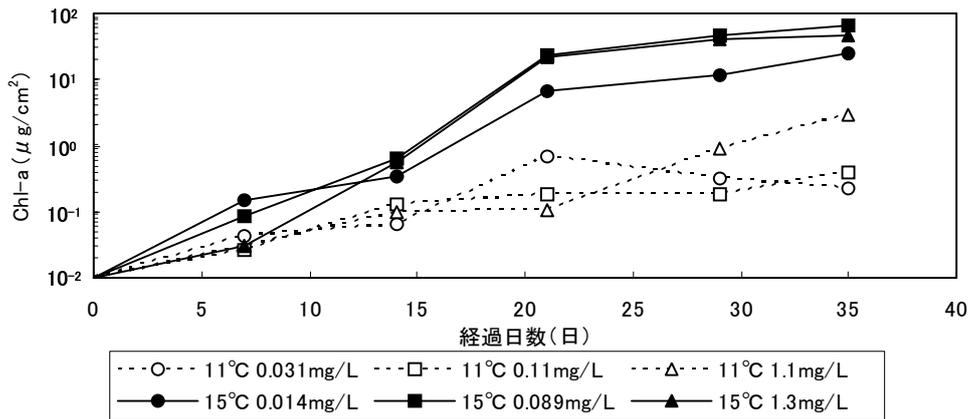


図-5 水温および PO₄-P 濃度と付着藻類生物量(Chl-a)の関係

4. まとめ

本調査は、下水処理水の残留塩素濃度が魚類に及ぼす影響を把握することを目的とした室内水槽実験を行うとともに、水温および PO₄-P 濃度が付着藻類に及ぼす影響を把握することを目的とした室内水路実験を行った。その結果以下のことが分かった。

- ・ 全残留塩素(TRC)濃度が 0.4~1.1mg/L、遊離残留塩素(FRC)濃度が 0.12~0.91mg/L の濃度範囲において、残留塩素濃度が高くなるにつれて金魚の死亡率が上昇した。
- ・ 水温が 11°C および 15°C、PO₄-P 濃度が 0.014~1.3mg/L の濃度範囲においては、水温が高い場合に、PO₄-P 濃度が藻類の増殖速度により強い影響を及ぼす傾向を示した。

本研究は、下水処理水が放流先水生生物に及ぼす影響因子として「栄養塩類（窒素・リン）」、「塩素等による消毒」、「水温」に注目し、これらの因子が水生生物に及ぼす影響を定量的に把握することを目的として平成 13 年度から平成 17 年度にかけて行われた。その結果、リン酸態リン(PO₄-P)濃度、全残留塩素(TRC)濃度、および水温と付着藻類並びに金魚との関係に関する定量的な知見を得ることが出来た。得られた成果は下水処理における高度処理導入の評価や下水処理レベルの目標設定等の基礎情報になる他、下水処理水再利用水質基準等マニュアルの改訂に反映され、生態系に配慮した下水処理の実施、円滑な処理水再利用の導入、適切な再利用施設の維持管理等に資するものである。

なお、本研究は、地球環境保全等試験研究費により実施されたものである。

【参考文献】

- 1) 下水道統計 平成 15 年度版、(社) 日本下水道協会
- 2) 日本の下水道 平成 16 年版、(社) 日本下水道協会
- 3) 荒谷裕介、竹歳健治、田嶋淳、中島英一郎、南山瑞彦：下水処理水中の栄養塩類濃度および残留塩素濃度と放流先に生成する付着藻類相の関係、下水道協会誌、Vol.42、No.510、111-123、2005/04
- 4) 下水試験方法 1997 年版、(社) 日本下水道協会
- 5) 河川水質試験方法(案) 1997 年版、建設省河川局監修
- 6) 下水処理水の再利用水質基準等マニュアル 平成 17 年 4 月 国土交通省都市・地域整備局下水道部 国土交通省国土技術政策総合研究所
- 7) 秋山 優、有賀 祐勝、坂本 充、横浜 康継 共著：藻類の生態、内田老鶴圃
- 8) W.M.ダーリー 著：藻類の生理生態学、培風館