

6.再生水利用の促進に関する調査

下水処理研究室 室 長 南山 瑞彦
主任研究官 吉澤 正宏
研 究 官 山縣 弘樹
研 究 員 山中 大輔

1. はじめに

近年、国民の環境への関心が深まり、下水道事業においても水辺環境の再生や創造のため、せせらぎ水路などの処理水再利用施設が整備される事例が増えている。これらの施設は、下水道事業が環境保全に果たす役割を周辺住民に理解して頂くための環境学習の場として有効であるとともに、周辺の街並みと一体となって良好な景観を形成する役割も有する。しかしながら、処理水再利用施設の整備及び維持管理に要する費用や整備効果が明確になっていないため、これらを適切に評価するための手法を提示する必要がある。また、下水道事業を正しく理解して頂き、また、良好な街並みを形成するためには施設の美観を維持することが重要であるが、藻類の異常発生により景観が損なわれる事例が少なからず見受けられる。これは、施設の維持管理性も損ねる場合が多い。そのため、良好な水辺環境を創造しつつ、美観、維持管理性も確保するための手法を検討する必要がある。

そこで、せせらぎにおける藻類異常発生抑制手法の一つとして、水生生物の藻類捕食を利用することの有効性について検討するとともに、再生処理施設の整備・維持管理に関する費用関数を導出する他、修景・親水施設の施設配置・施設構造について実態調査を行った。

2. 水生生物の藻類捕食の利用に関する検討

2. 1 調査方法

再生水を利用したせせらぎにおける維持管理の簡易化のための藻類異常発生抑制手法の一つとして、水生生物による藻類捕食の利用可能性について検討するため、人工水路を用いて藻類を培養させた素焼き製付着板を実験水槽（市販 60cm 水槽）の底に設置し、水生生物による付着藻類の捕食状況を調査した（図-1）。

試験水は、浄化センターからの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による処理水が混合された後に急速ろ過）を用いた。実験は、水を交換しない止水式で行った。実験開始時の水槽内の試験水の水質を表-1に示す。実験期間中は、ヒーターを設置して水温を一定に保つとともに

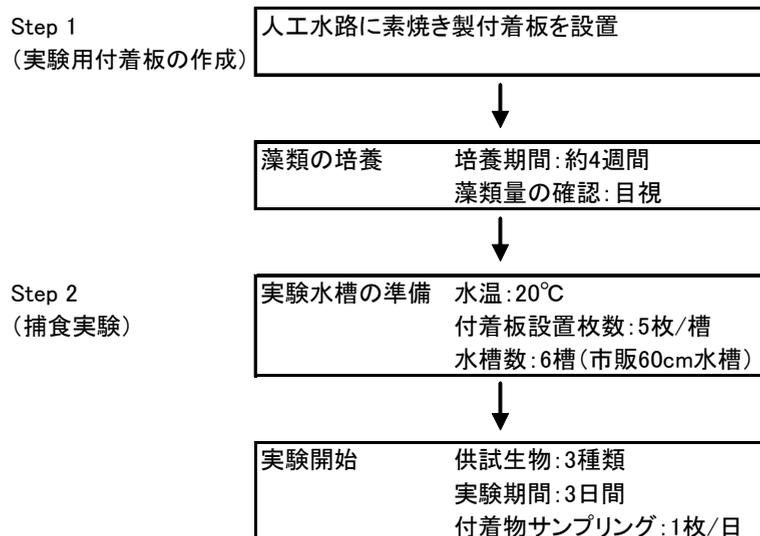


図-1 実験フロー

表-1 試験水の水質

供試生物	(mg/L)		
	ミナミヌマエビ	イシマキガイ	オイカワ
BOD	0.9	1.3	0.7
TOC	4.7	3.3	4.4
T-N	6	6.5	5.9
NH ₄ -N	7.4 × 10 ⁻²	1.3 × 10 ⁻¹	6.5 × 10 ⁻²
NO ₂ -N	1.0 × 10 ⁻³	6.0 × 10 ⁻³	1.2 × 10 ⁻²
NO ₃ -N	5.5	5.2	5.4
T-P	1.3 × 10 ⁻¹	1.8 × 10 ⁻¹	8.5 × 10 ⁻²
PO ₄ -P	8.6 × 10 ⁻²	1.3 × 10 ⁻¹	5.5 × 10 ⁻²

曝気装置を用いてエアレーションを行った。

実験に供した水生生物の個体数、平均体長および平均体重を表-2に示す。昨年度の調査結果¹⁾をもとに、せせらぎへの適用可能性の低い金魚およびブレコを対象外とし、ミナミ

表-2 供試生物

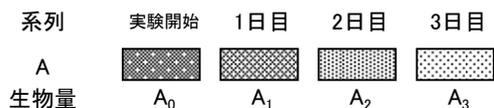
供試生物 (学名)	個体数(個体)					平均体長 (cm)	平均体重 (g)	
	系列	A	B	C	D			
ミナミヌマエビ (<i>Neocaridina denticulata</i>)		20	40	60	100	0	2.5	0.2
イシマキガイ (<i>Clithon retropictus</i>)		20	30	40	60	0	1.8	1.9
オイカワ (<i>Zacco platypus</i>)		5	10	15	20	0	9.5	11.3

注) 平均体長および平均体重は実験開始時

ヌマエビ、イシマキガイおよびオイカワを供試生物として選定した。各供試生物の個体数は、昨年度実験時を超える個体数を1系列設定し、設定した。

素焼き製付着版(1枚:9cm×9cm)は、実験水槽に5枚ずつ設置して実験に供し、付着板からの付着物のサンプリングを3日間連続して同時刻に行い、サンプリング後の付着板は水槽内に戻さないこととした。

藻類捕食量の算定方法の概念図を図-2に示す。図中の Q_{An} の算出式のとおりn日目における全藻類捕食量を求め、全藻類捕食量を供試生物個体数および経日数で除することで水生生物



$$M = (A_0 + B_0 + C_0 + D_0 + E_0) / 5$$

$$P_{An} = (M - A_n) / M \times 100$$

$$Q_{An} = Q_{An-1} + (L_n - A_n) \times S \times (5 - (n-1))$$

$$q_{An} = Q_{An} / n / k$$

M : 実験開始日の各系列におけるChl-aの平均値 ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)

P_{An} : 実験系列Aのn日目における藻類捕食率(%)

Q_{An} : 実験系列Aのn日目における全捕食量(μg)

ただし、n=1のとき $Q_{An-1}=0$, $L_n=M$

n=2,3のとき $L_n=A_{n-1}$

q_{An} : 実験系列Aのn日目における、水生生物一個体あたり1日あたりの捕食量($\mu\text{g}/\text{個体}/\text{日}$)

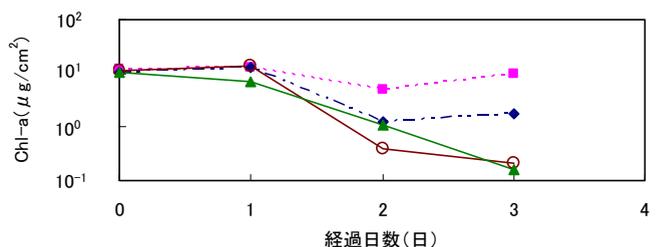
A_n : 実験系列Aのn日目のChl-a($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)

n : 実験経過日数(1~3日)

k : 系列Aにおける水生生物個体数

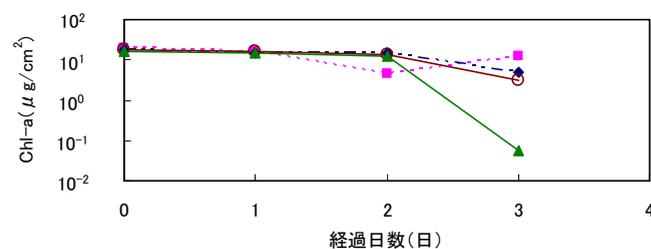
S : 付着板1枚の面積(=81cm²)

図-2 藻類捕食量の算定概念図



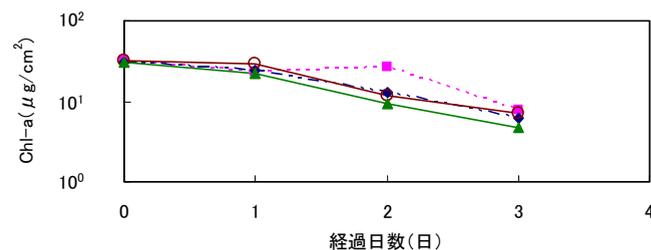
---■--- A 20個体 -●- B 40個体 -○- C 60個体 -▲- D 100個体

(1) ミナミヌマエビ



---■--- A 20個体 -●- B 30個体 -○- C 40個体 -▲- D 60個体

(2) イシマキガイ



---■--- A 5個体 -●- B 10個体 -○- C 15個体 -▲- D 20個体

(3) オイカワ

図-3 各系列における藻類生物量の経日変化

1 個体あたり 1 日あたり藻類捕食量 q_{An} (μ g-Chl-a/個体/日；以下、捕食量 q_{An})を算定し、評価することとした。

2. 2 調査結果および考察

各系列における付着藻類の経日変化(An, Bn, Cn, Dn : n=1-3)を図-3に示す。各供試生物において、日数を経るにつれ付着藻類が減少する傾向を示し、捕食率 P_{An} (図-2)が 80%を超えた時に当該系列における付着藻類がおおむね捕食されたと考え、捕食率 P_{An} が 80%を超えた系列が生じた日における捕食結果を表-3に示す。個体数が多い系列であるほど、捕食量 q_{An} は少なくなっている。これは、水生生物 1 個体に対する付着板面積の割合、すなわち水生生物 1 個体に対する付着藻類量の割合が小さいためであるものと推察される。捕食量 q_{An} は、ミナミヌマエビ(20 個体)では 47.6μ g-Chl-a/個体/日、イシマキガイ(20 個体)では 39.6μ g-Chl-a/個体/日、オイカワ(5 個体)では 465.8μ g-Chl-a/個体/日であった。この値は今後の検討の目安となるが、止水式による短期間の水槽実験によるものであるため、藻類の増殖を考慮した条件による長期間の実験やフィールドにおける調査などを行い、検討を重ねる必要があるものと考えられる。これらの水生生物は、せせらぎの規模や発生する藻類量に見合った個体数を確保することで、藻類異常発生抑制手法の一つとして利用可能であるものと期待される。

表-3 捕食結果

系列	P_{An} 捕食率(%)			Q_{An} 全捕食量(μ g-Chl-a)			q_{An} 捕食量(μ g-Chl-a/個体/日)		
	ミナミヌマエビ	イシマキガイ	オイカワ	ミナミヌマエビ	イシマキガイ	オイカワ	ミナミヌマエビ	イシマキガイ	オイカワ
A	55.6	28.9	75.2	1,905	2,376	6,987	47.6	39.6	465.8
B	89.1	71.4	80.9	3,104	3,559	8,394	38.8	39.5	279.8
C	96.4	82.0	77.6	3,362	3,960	7,804	28.0	33.0	173.4
D	90.3	99.7	85.2	3,666	5,045	9,187	18.3	28.0	153.1

注) ミナミヌマエビは2日目、イシマキガイおよびオイカワは3日目の値

3. モデル検討による再生処理費用関数の導出

過年度調査¹⁾において、再生処理施設の建設費用及び維持管理費用について、実態調査による検討を試みたが、処理場毎の背景状況が異なることや導入施設が少ないことなどのため、費用関数の導出まで至らなかった。このため、本年度調査では、再生処理施設に用いられる主な単位プロセスについて導入実績などをもとに基本的な設計諸元を与え、これらを組み合わせた再生処理方法毎に、下水処理水再利用に係る建設費・維持管理費の実態を勘案しつつ、モデル計算により費用関数を導出することとした。

検討する【単位プロセス】とその主要な[設計諸元]は、【前処理】[オートストレーナ]、【凝集剤添加】[注入率 5mg/L]、【砂ろ過】[ろ過速度 300m/d]、【オゾン処理】[注入率 10mg/L]、【活性炭処理】[ろ過速度 120m/d]、【MF膜ろ過】[外圧中空糸型]、【RO膜】[スパイラル型]、【紫外線消毒】[処理水量 10,000m³/d 以下は低圧ランプ、10,000m³/d 超は中圧ランプ]及び【塩素消毒】[注入率 4mg/L]とした。

これらを組み合わせた再生処理方法は、【凝集剤添加】の無い 5 処理方法 (I~IV・VII-a) と、【凝集剤添加】を含む 7 処理方法 (I~VII-b) を想定し、それぞれの単位プロセスの組み合わせは、表-4の「再生処理方法」に示すとおりである。なお、【前処理】はすべてに含むものとし、【塩素消毒】は別途考慮するものとして別に算出するものとした。

また、再生処理費用(建設費及び維持管理費)の算出は以下に基づいて行った。

- ①モデル計算は、処理水量（Q）1,000、5,000、10,000及び20,000m³/dについて行う。ただし、V及びVIは、1,000及び5,000m³/dについて行う。
- ②機械・電気設備の据付費、経費等は、機器費の80%とする。
- ③土木費は機器配置概略図より躯体空容量を求め、30千円/空・m³として算出する。
- ④建築費は機器配置概略図より床面積を求め、250千円/m²として算出する。
- ⑤機械・電気設備の補修費は、機器費の3%とする。
- ⑥活性炭の交換周期は、前段が砂ろ過の場合に2回/年、砂ろ過+オゾンの場合に1回/2年とする。
- ⑦MF膜の交換周期は1回/3年、RO膜の交換周期は1回/5年とする。
- ⑧紫外線ランプの交換周期は、低圧ランプで1回/1.5年、中圧ランプで1回/年とする。
- ⑨電力単価は15円/kWhとし、基本電力を含めない。
- ⑩維持管理費に人件費は含めない。

このようにして求められた処理水量と再生処理費用の関係から費用関数を導出した。得られた結果を表-4に整理するとともに、I～VII-b（凝集剤添加有）の費用関数を図-4（(a)建設費、(b)維持管理費）に示した。凝集剤添加無の場合は、処理水量により、建設費については図-4の40～60百万円減、維持管理費については同5～50百万円/年減と計算された。

次に再生処理のライフサイクルコストを概算した。建設費の年費用は、表-4の費用関数から計算される費用を、費用関数を導出する際に求めた土木・建築費用と機械・電気費用の比率により按分し、それぞれを年費用に換算し

表-4 再生処理費用関数

区分	再生処理方法	建設費 (百万円)	維持管理費 (百万円/年)	適用範囲 (m ³ /日)	
I	a 砂ろ過	$3.9335 \cdot Q^{0.5492}$	$0.0109 \cdot Q^{0.8542}$	Q ≤ 20,000	
	b 凝集剤添加+砂ろ過	$6.4927 \cdot Q^{0.5042}$	$0.0158 \cdot Q^{0.8846}$		
II	a 砂ろ過+オゾン	$11.139 \cdot Q^{0.5379}$	$0.0737 \cdot Q^{0.7471}$		
	b 凝集剤添加+砂ろ過+オゾン	$13.815 \cdot Q^{0.5182}$	$0.0690 \cdot Q^{0.7879}$		
III	a 砂ろ過+活性炭	$2.6684 \cdot Q^{0.6969}$	$0.0450 \cdot Q^{0.9828}$		
	b 凝集剤添加+砂ろ過+活性炭	$3.6453 \cdot Q^{0.6668}$	$0.0500 \cdot Q^{0.9785}$		
IV	a 砂ろ過+オゾン+活性炭	$7.6477 \cdot Q^{0.6331}$	$0.0576 \cdot Q^{0.8722}$		
	b 凝集剤添加+砂ろ過+オゾン+活性炭	$9.0958 \cdot Q^{0.6166}$	$0.0625 \cdot Q^{0.8780}$		
V	b 凝集剤添加+砂ろ過+RO膜ろ過	$13.101 \cdot Q^{0.5460}$	$0.0659 \cdot Q^{0.8653}$		Q ≤ 5,000
VI	b 凝集剤添加+MF膜ろ過+RO膜ろ過	$9.8560 \cdot Q^{0.5979}$	$0.0489 \cdot Q^{0.9056}$		Q ≤ 5,000
VII	a 砂ろ過+紫外線消毒	$7.9673 \cdot Q^{0.5239}$	$0.0203 \cdot Q^{0.8591}$	Q ≤ 20,000	
	b 凝集剤添加+砂ろ過+紫外線消毒	$10.962 \cdot Q^{0.4952}$	$0.0250 \cdot Q^{0.8781}$		
VIII	塩素消毒	$17.688 \cdot Q^{0.0632}$	$0.0044 \cdot Q^{0.8903}$		

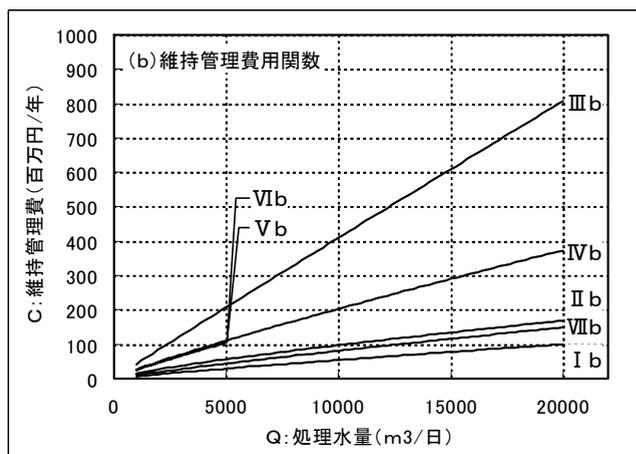
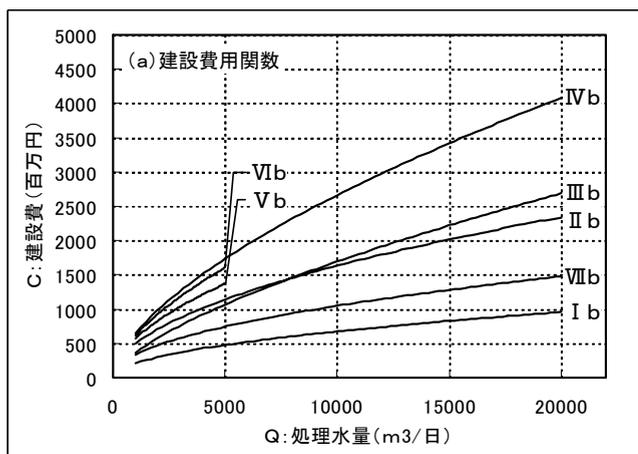


図-4 再生処理費用関数

て合算した。ここで、割引率は4%、土木・建築施設の耐用年数を50年、機械・電気設備の耐用年数を15年とした。維持管理費は、費用関数から計算される費用を年費用とした。

ライフサイクルコストは、年費用を年間処理水量で除し、単位水量当たりの費用で示した。表-5は、再生処理方法毎に建設費分（上段）、維持管理費分（中段）及びこれらを合計したライフサイクルコスト（下段）をまとめたものである。

再生水供給事業を考える場合、表-5に含まれない費用として、維持管理の人件費の他、水質分析等のモニタリング費用や送水施設（ポンプ設備等）の整備費用・運転費用などを考慮する必要があるが、例えば、水道水の生産費用（188.56円/m³（H17）：日本水道協会HPより）と比べると、Ⅲb、Ⅳa及びⅣbの1,000m³/日規模以外では、再生処理費用が小さくなる事が分かる。

4. 修景・親水施設の施設構造等に関する調査

わが国では、下水処理水の再利用用途として修景・親水利用が比較的多い。このような修景・親水利用を実施している下水道管理者に対してアンケート調査を実施し、修景・親水施設（再利用施設）等の施設配置や施設構造について検討するための基本的な情報を整理した。

施設配置については、下水処理場、再生処理施設及び再利用施設の設置地域（住宅地域、商業地域、工場地域、公園緑地、河川隣接地、その他）とそれぞれの間の送水距離について調査し、83施設から回答が得られた。再生処理施設はほとんどが下水処理場内の設置（送水距離=0m）であったことから、下水処理場と再利用施設の設置地域と送水距離について整理した。回答全体では、下水処理場の設置地域は住宅地域や工場地域が多く、再利用施設は住宅地域や公園緑地が多くなるが、図-5に下水処理場の設置地域とその下水処理場から送水される再利用施設の設置地域との関係を整理した（設置地域について複数回答あり）。いずれも下水処理場と再利用施設の設置地域が同じとなる、すなわち、下水処理場内やその周辺で再利用している場合が多いことが推定されるが、回答数の多

表-5 ライフサイクルコスト

区分	LCC(円/m ³)				
	1,000 m ³ /日	5,000 m ³ /日	10,000 m ³ /日	20,000 m ³ /日	
I	a	33.0	16.6	12.4	9.0
		10.9	8.6	7.8	7.0
		43.9	25.2	20.2	16.1
	b	42.0	19.1	13.8	9.7
		19.5	16.2	15.0	13.8
		61.5	35.3	28.7	23.5
II	a	96.5	47.6	34.6	24.8
		35.2	23.4	19.7	16.5
		131.7	71.1	54.3	41.3
	b	105.9	50.2	35.9	25.4
		43.7	31.0	26.8	23.1
		149.6	81.2	62.7	48.6
III	a	65.6	43.0	35.6	29.0
		109.5	106.5	105.2	104.0
		175.1	149.5	140.9	133.0
	b	74.6	45.8	37.1	29.5
		118.1	114.1	112.4	110.7
		192.7	159.9	149.4	140.2
IV	a	128.1	74.3	58.0	44.9
		65.3	53.1	48.6	44.5
		193.4	127.4	106.6	89.4
	b	137.3	77.0	59.4	45.4
		73.7	60.6	55.7	51.2
		211.1	137.5	115.1	96.6
V	b	109.5	54.9	—	—
	71.2	57.3	—	—	
	180.7	112.2	—	—	
VI	b	116.4	65.6	—	—
	69.8	60.0	—	—	
	186.2	125.5	—	—	
VII	a	61.5	30.1	21.6	15.2
		21.0	16.8	15.2	13.8
		82.5	46.9	36.8	29.0
	b	71.0	32.7	23.0	15.8
		29.5	24.3	22.3	20.5
		100.5	57.0	45.3	36.3

※上段：建設費、中段：維持管理費、下段：合計を示す。

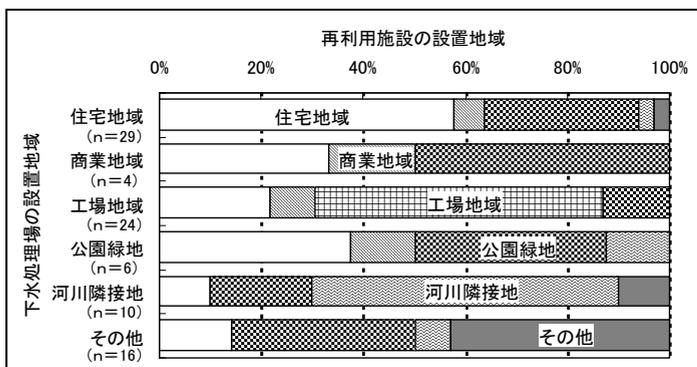


図-5 下水処理場と再利用施設の設置地域

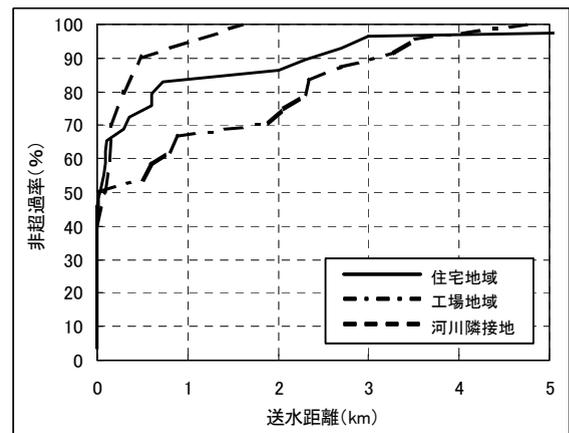


図-6 下水処理場の設置地域と送水距離

い住宅地域、工場地域及び河川隣接地に設置する下水処理場について送水距離の分布を整理すれば、図-6のとおりとなる。図-6から、河川隣接地<住宅地域<工場地域の順に送水距離が長くなる傾向があることが分かる。工場地域では、より利用者が見込める地域まで長距離を送水せざるを得ないという事情があるものと推測される。また、河川隣接地の場合は、その地域特性から想像すると、当該下水処理場或いはその周辺を住宅地域郊外の公園的な施設として整備しているものと思われる。

再利用施設の施設構造については、住民や学識経験者等の外部意見や施設構造上の配慮について調査した。外部意見の反映については、回答のあった80施設中、約4割の30施設について施設構造の決定の際に外部意見を反映させるための機会を設定したという回答があった。意見聴取対象者は、利用者(住民)17施設、学識経験者6施設、その他11施設(複数回答あり)であった。

施設構造上、配慮した点については、「見た目(利用者の目)」68施設が最も多く、「生態系」25施設、「維持管理性」17施設、「その他」21施設(複数回答あり。n=79施設)であった。「その他」には、「修景・親水利用以外の利用」が5施設で最も多かった。

「見た目(利用者の目)」については、具体的なイメージや雰囲気として、「溪流」(23%)、「利用しやすい空間」(21%)、「小川」(17%)、「周辺との調和」(17%)、「自然」(13%)、「潤い」(12%)などのキーワードがあげられた(n=52施設)。

「生態系」に配慮するために具体的に実施した内容については、「草花・樹木の植栽」が最も多かった。

「維持管理性」については、「清掃を容易にするため」がほとんど(13施設)であり、「清掃活動を容易にする」(8施設)の他、「藻類の発生抑制」(3施設)、「落ち葉対策」(2施設)が含まれる。具体的には、コンクリート張りにするなどの「施設表面の工夫」、排水ポンプなどの「対策設備の追加」などであった。

これらの施設構造上の配慮について、施設の供用開始後の評価は概ね良好との回答が得られたが、その中では「維持管理性」の評価が最も低く、約2割で問題が生じたという回答があった。

3. まとめ

- (1) 再生水を利用したせせらぎにおける維持管理の簡易化のための藻類異常発生抑制手法の一つとして、水生生物による藻類捕食の利用可能性について検討した。実験結果より、イシマキガイおよびミナミヌマエビの捕食量が40~50 $\mu\text{g-Chl-a}$ /個体/日程度、オイカワは470 $\mu\text{g-Chl-a}$ /個体/日程度であることが分かった。水生生物による藻類捕食についてはフィールドにおける調査・検証等を行い、水生生物を利用した藻類の除去に関する情報を収集・整理する必要がある。また、藻類捕食の利用以外の藻類異常発生抑制手法の検討のため、せせらぎの河床条件など環境条件の違いが付着藻類の発生に及ぼす影響について併せて調査する必要がある。
- (2) 処理水再生処理施設の整備及び維持管理に関するB/C評価の一環として、9の単位プロセスを組み合わせた12の再生処理方法毎に、再生処理施設の費用関数(建設費及び維持管理費)をモデル計算により導出するとともに、ライフサイクルコストを概算した。
- (3) 下水処理水の再利用用途として比較的多い、修景・親水利用について施設配置や施設構造についてアンケート調査を実施した。その結果、再生処理施設は下水処理場に併設することが多く、下水処理場の設置地域が河川隣接地<住宅地域<工場地域の順に再利用施設までの送水距離が長くなる傾向があった。施設構造については、「見た目(利用者の目)」に配慮することが多く、「溪流」や「利用しやすい空間」、「小川」、「周辺との調和」をイメージした空間づくりを求めている。

参考文献

- 1) 南山瑞彦、田嶋淳、荒谷裕介、平出亮輔：平成17年度下水道関係調査研究年次報告集、pp.27-32、平成18年6月