

N-6 微生物固定化担体を用いた、 下水再生水放流水路における 付着藻類の増殖を抑制する技術の開発

岡安 祐司^{1*}・南山 瑞彦¹・鈴木 穰¹

¹独立行政法人土木研究所 水質チーム (〒305-0821茨城県つくば市南原1番地6)

* E-mail: okayasu@pwri.go.jp

1. はじめに

下水再生水は、都市内の水資源として有効利用が求められているが、再生水中の窒素やリン等の栄養塩類により、都市内水路や池などに利用した場合に、付着藻類や浮遊藻類の発生を引き起こし、景観障害等の問題が生じる。この問題に対応するため、再生水中の栄養塩類の濃度を極めて低くする方法（凝集剤の大量使用によるリンの高度除去等）が試験的に適用されているが、設備費、運転費とも高価であり、普及していないのが現状である。

そこで、筆者らは、実験室規模で、下水処理水に対して好気性の生物膜処理を適用し、主としてマンガン濃度を低下させることにより、藻類増殖の抑制を可能とする簡易な手法を開発した^{2,3}。本研究は、本手法のパイロット規模での実証実験を目的として実施した。

2. 研究方法

(1) 担体処理実験

担体処理連続実験は、夏季の7月初旬より開始し9月第2週目までの約2ヶ月間実施した。図-1に示すように、凝集剤添加循環式硝化脱窒法および急速砂ろ過法により処理された茨城県霞ヶ浦流域下水道事務所霞ヶ浦浄化センターの下水処理水を、微生物保持担体（JFEエンジニアリング株式会社製 Bio-Tube、ポリプロピレンを基材とした中空円筒状の固体、4mm^{OD}×3mm^{ID}×5mm^L）が添加された円筒形の反応槽（大阪水交株式会社製、材質 ポリエチレン、内径64cm、有効水深87cm、有効容量0.28m³、水理学的滞留時間（HRT）2時間）に導入し、下部より曝気を行い、担体表面に自然発生的に付着した生物膜により高度処理を実施した。なお、反応槽における担体添加率は30%とした。さらに、反応槽流出水は下向流式急速砂ろ過装置（内径10cm、アンスラサイト層厚62.5cm、砂層厚

37.5cm、ろ過速度=300m/日）を通過させ、余剰生物膜を分離除去し担体処理水を得た。下向流式急速砂ろ過装置の洗浄は、担体処理水を用いて、3時間に1回の頻度で、1m/分の速度で、2分間回、逆流洗浄した。

水質測定は、微生物保持担体上の生物膜の馴致期間として1ヶ月程度確保した後、8月上旬から実施した。週1回の頻度で、下水処理水および担体処理水について、現地に、水温、pH、溶存酸素（DO）濃度を観測するとともに、スポット採水試料中の浮遊物質（SS）、有機性浮遊物質（VSS）、溶解性有機性炭素（DOC）、総窒素（T-N）、アンモニア性窒素（NH₄⁺-N）、亜硝酸性窒素（NO₂⁻-N）、硝酸性窒素（NO₃⁻-N）、総りん（T-P）、オルトリン酸態りん（PO₄³⁻-P）の各濃度を測定した。また、2週間に1回の頻度で、スポット採水試料中の総鉄（T-Fe）、総マンガン（T-Mn）の測定を実施した。

(2) 模擬池実験

霞ヶ浦浄化センターの下水処理水と、(1) 担体処理実験で得られた担体処理水を、それぞれ、屋外に設置された同一形状の円筒形の試験池（大阪水交株式会社製、ポリエ

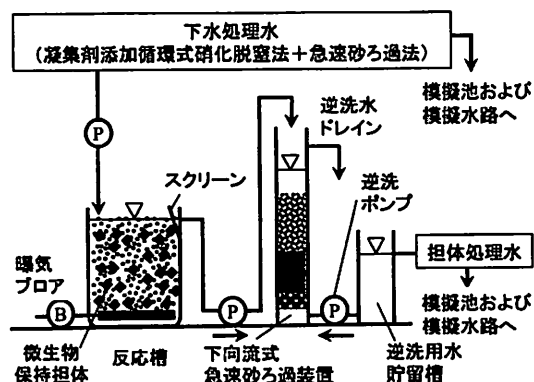


図-1 担体処理実験の概要

チレン製、内径 96.5cm、有効水深 125cm、有効容量 1m³）に満たし、以降は水理学的滞留時間（HRT）が 7 日となるように連続的に通水した。

水質測定は、模擬実験池の生物相の馴致期間として 1 ヶ月程度確保した後、8 月上旬から実施した。週 1 回の頻度で、下水処理水および担体処理水を通水した模擬池の表層水について、現地にて、水温、pH、溶存酸素（DO）濃度を観測するとともに、スポット採水試料中の SS、VSS、DOC、T-N、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、T-P、PO₄³⁻-P、クロロフィル *a*（Chl-*a*）の各濃度を測定した。なお、試料採取は 14:00 に実施した。

(3) 模擬水路実験

担体処理実験における微生物保持担体上の生物膜の馴致期間として 1 ヶ月程度確保した後、8 月上旬から、霞ヶ浦浄化センターの下水処理水と、(I) 担体処理実験で得られた担体処理水を、それぞれ、屋外に設置された同一形状の循環式試験水路（塩化ビニール製、長さ 400cm、幅 10cm）に通水し、水深 8cm、流速 15cm/sec になるように流量を調整した。また、水路および循環配管内水の水理学的滞留時間（HRT）は約 22 分となるように設定した。また、水路上に発生する付着藻類等の固形物の状況を把握するために、実験開始時に水路内の壁面および底面に 9cm×9cm×0.5cm の素焼き板を三面張り状に敷き詰めた。

水質測定は、週 1 回の頻度で、下水処理水および担体処理水を通水した模擬水路の表層水について、現地にて、水温、pH、溶存酸素（DO）濃度を観測するとともに、右岸側底面、左岸側の素焼き板を各 3 枚ずつ採取し、素焼き板表面上の固形物をポリエチレン製歯ブラシにて掻き取り、純水に転溶し、5L にメスアップ、均質化した後の水試料中の SS、VSS、T-N、T-P、Chl-*a* の各濃度を測定し、素焼き板の単位面積当たりの付着物量として整理した。なお、採取した素焼き板の後には、新たな素焼き板を補充して設置した。また、試料採取は 14:00 に実施した。

3. 実験結果

(1) 担体処理実験

表-1 に、実験期間中の霞ヶ浦浄化センターの下水処理水、担体処理水の水質測定結果を示す。下水処理水に比べて、微生物保持担体による好気性生物膜処理および急速砂ろ過処理を行った担体処理水では、曝気による、酸素と炭酸ガスの交換による pH、DO の上昇がみられた。また、他の富栄養化関連項目については大きな差が見られない一方、T-Fe 濃度はわずかに、また、T-Mn 濃度は大きく低下した。反応槽前後の Mn の形態は、担体上のマンガン酸化細菌等の活動により、溶解性から懸濁態へ変化しており、それが、後段の急速砂ろ過装置でろ過され、除去され

表-1 担体処理実験における水質測定結果
(SS 以降は平均値)

項目	単位	下水処理水	担体処理水
水温	℃	26.4~27.3	25.7~28.1
pH	—	7.1~7.2	8.0~8.2
DO	mg/L	2.7~3.4	4.9~6.8
SS	mg/L	1.2	1.0
VSS	mg/L	0.9	0.5
DOC	mg/L	3.6	3.7
T-N	mg/L	5.8	6.0
NH ₄ ⁺ -N	mg/L	0.1	0.0
NO ₂ ⁻ -N	mg/L	0.0	0.0
NO ₃ ⁻ -N	mg/L	4.7	4.7
T-P	mg/L	0.19	0.19
PO ₄ ³⁻ -P	mg/L	0.15	0.16
T-Fe	μg/L	24.1	20.0
T-Mn	μg/L	7.2	0.4

表-2 模擬池実験における水質測定結果
(SS 以降は平均値)

項目	単位	下水処理水を通水した 模擬池 (表層水)	担体処理水を通水した 模擬池 (表層水)
水温	℃	24.6~33.0	25.0~33.3
pH	—	9.2~10.5	9.7~10.6
DO	mg/L	8.2~20.0	8.8~18.4
SS	mg/L	810	24
VSS	mg/L	744	21
DOC	mg/L	7.1	4.5
T-N	mg/L	28.2	6.4
NH ₄ ⁺ -N	mg/L	0.3	0.1
NO ₂ ⁻ -N	mg/L	0.1	0.0
NO ₃ ⁻ -N	mg/L	3.1	3.9
T-P	mg/L	4.71	0.37
PO ₄ ³⁻ -P	mg/L	0.08	0.07
Chl <i>a</i>	μg/L	9784	156

表-3 模擬水路実験における水質測定結果
(SS 以降は平均値)

項目	単位	下水処理水を通水した 模擬水路	担体処理水を通水した 模擬水路
水温	℃	27.7~35.1	28.1~35.2
pH	—	7.6~9.7	8.3~10.0
DO	mg/L	5.5~8.1	7.0~8.5
TS	g/m ²	76.6	37.6
VTS	g/m ²	45.0	19.5
T-N	g/m ²	2.6	1.4
T-P	g/m ²	0.35	0.21
Chl <i>a</i>	mg/m ²	505	298

ていると考えられる。

(2) 模擬池実験

表2に、実験期間中の霞ヶ浦浄化センターの下水処理水を通水した模擬池と、担体処理水を通水した模擬池の表層水の水質測定結果を示す。

下水処理水を通水した場合に模擬池では、実験期間を通じて水面を糸状藻類が覆い尽くしていたが、担体処理水を通水した模擬池では、そのような現象はみられなかった。水質測定結果を比較すると、固形物量や藻類の現存量を表す、SS、VSS、T-N、T-P、Chl-*a*について大きな差が見られた。

(3) 模擬水路実験

表3に、実験期間中の霞ヶ浦浄化センターの下水処理水を通水した模擬水路と、担体処理水を通水した模擬水路の水質測定結果を示す。

下水処理水を通水した場合に模擬水路では、実験期間を通じて壁面から糸状藻類が繁茂し、水路の水面上を覆う光景が見られたが、担体処理水を通水した模擬水路では、糸状藻類の繁茂は顕著に抑えられていた。水質測定結果を比較すると、固形物量や藻類の現存量を表す、SS、VSS、T-N、T-P、Chl-*a*について1.6～2倍の差が見られた。

4. 考察

ここでは、担体処理水を通水した模擬池および模擬水路で、藻類の増殖が抑制される要因について考察する。

Chetelat⁹が、カナダの南オンタリオと西ケベックの13河川について夏場に藻類量と藻類群集に及ぼす栄養塩類濃度と流速の影響を検討した結果によると、藻類量はT-P濃度と強い相関があり、0.006～0.082mg/Lの範囲においてT-P濃度と正の相関があることが示されている。本研究で使用した霞ヶ浦浄化センターの下水処理水および担体処理水では、T-P濃度は通常の下水処理水に比べて低減されていたが、そのレベルは0.2mg/L程度であり、T-P濃度が藻類増殖の律速になっているとは考えられない。

そこで、担体処理水において特徴的に低減されているT-Mnに注目する。表4は国立環境研究所⁹が販売している環境標準試料のクロレラとアオコのT-P、T-Mnの含有率と下水処理水、担体処理水中のT-P、T-Mnの濃度を示したものである。クロレラとアオコのデータから、T-P/T-Mnが228～246を上回る場合には、T-Mnが水中での藻類増殖の制限因子になると考えられる。実際の模擬池や模擬水路では多種多様な藻類が出現しており、一概にクロレラとアオコのためのデータを以て判断することは難しいが、本研究で得られた担体処理水中のT-P/T-Mnは475であり、T-Mnが藻類増殖の制限因子となっている可能性が高いと考えられる。

表4 藻類、下水処理水、担体処理水中のP、Mnの組成

項目	クロレラ	アオコ	下水処理水	担体処理水
T-P	1.7%	0.89%	0.19mg/L	0.19mg/L
T-Mn	69±5 mg/kg	39±3 mg/kg	7.2μg/L	0.4μg/L
T-P/T-Mn	246	228	26	475

5. まとめ

下水再生水を、修景用水や親水用水として水路等に利用した際に、付着藻類が増殖する事例が報告されている。この原因としては、下水再生水の水質や水路における諸条件（水温、水深、流速等）の影響が考えられている。本研究では水質に焦点を当て、下水再生水放流先の池や水路における付着藻類増殖を低減することを目的とした。

凝集剤添加硝化脱窒法によりT-N濃度が6mg/L以下、T-P濃度が0.2mg/L以下程度にまで低減された下水処理水に対して、さらに結合法微生物固定化担体を添加した反応槽における好気処理および急速砂ろ過を行うことにより、有機物や微量金属の酸化・不溶化除去を行い、下水処理水放流先の池や水路付着藻類増殖を低減することを試みた。下水処理水および担体処理を付加した処理水を、屋外模擬池および模擬水路に連続的に通水した結果、担体処理を付加することにより、付着藻類増殖が抑制されることが確認された。また、藻類増殖の制限因子は、担体処理により効率的に除去されるT-Mnであると考えられた。

6. 今後の課題

本研究にて開発された技術の、実施設での実証検討を行う予定である。また、下水再生水の水質以外の、水路における諸条件（水温、水深、流速等）の影響の観点も含めた検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 国土交通省都市・地域整備局下水道部ほか：下水処理水の再利用水質基準等マニュアル, 2005
- 2) 岡安祐司ほか：下水の高度処理による藻類増殖能の抑制, 第42回日本水環境学会年会講演集, p.280, 2008
- 3) 岡安祐司ほか：下水の高度処理による付着藻類増殖の抑制, 第43回日本水環境学会年会講演集, p.359, 2009
- 4) J. Chetelat, F.R. Pick, A. Morin and P.B. Hamilton : Periphyton biomass and community composition in rivers of different nutrient status, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, Vol. 56, pp.560-569, 1999
- 5) 国立環境研究所 : <http://www.nies.go.jp/labo/crm/index.html>