

ひも状生物接触担体を用いた下水中の 汚濁物質除去とリンの回収

濱 崎 竜 英^{*}・西 村 昌 次^{**}・松 田 典 友^{*}
村 井 雄 樹^{*}・鈴 木 實^{***}・菅 原 正 孝^{*}

Removal of Polluted Matters in Sewage and Recovery of Phosphorus Using String Bio Film Media

Hamasaki, T.^{*}・Nishimura, S.^{**}
Matsuda, N.^{*}・Murai, Y.^{*}
Suzuki, M.^{***}・Sugahara, M.^{*}

Abstract

The purpose of this study is to remove pollution matter such as organic matter and nutrients from sewage using a bio film method with string media and then to recover the phosphorus from the used string media.

The activated sludge method is the most popular method for sewage treatment.

However this method produces a lot of excess sludge and increases the costs of the sewage treatment facility. The results of our experiments on removal of organic matter show that a bio film method using string bio film media can remove organic matters in sewage.

Sewage also contains high concentrations of phosphorus, which should be removed to improve the treated water quality but is an important nutrient in agriculture. Since phosphorous becomes depleted in soil by agricultural activity, it must be added regularly to maintain soil fertility. This makes recovered phosphorous a valuable by-product of sewage treatment. This study therefore also evaluated phosphorus recovery from the used string media with hot water and confirmed the possibility of phosphorous recovery by that method.

平成21年11月16日 原稿受理

^{*}大阪産業大学 人間環境学部

^{**}大阪産業大学大学院人間環境学研究科

^{***}関西PGS株式会社

要旨

汚泥発生量が少ないとされる生物接触酸化法に着目し、中小規模の処理施設を対象とした下水処理法について基礎的な検討を行った。具体的には、今までに得た研究成果から、ひも状生物担体を選択し、反応時間の違いによる汚濁物質の除去特性を見出す室内実験、室内実験の結果を踏まえ、実際の下水処理場において、比較的大型の反応槽を用いた実証的な屋外実験を実施した。また、農業分野ではリンの枯渇が懸念されていることから、農地還元を目的としたリン回収の基礎的な実験を行った。室内実験では、ひも状接触担体を取り付けた実験系と取り付けていない対照系の2系列で行った。BODの除去率は、6時間の曝気時間では実験系が対照系よりも高い結果となり、24時間以上ではいずれも55%から93%の除去率を得ることができた。このようなことから、曝気によって有機物は化学的または生物学的に酸化が促進されることにより分解されるが、ひも状接触担体を用いた実験系はより促進されることがわかった。屋外実験は、大阪府内の下水処理場に2 m³の反応槽を設置して、下水処理場の流入下水を対象に実施した。BOD及びCODは一部の除き43～76%の除去率であり、SSは67～89%除去できた。リン回収実験は、屋外実験終了後、ひも状接触担体の一部を取り出し、実験系として60℃に制御された電気炉によって加熱した水500mLに浸漬したもの、対照系として常温(20℃程度)の水500mLに浸漬したものの2系列における1時間後の浸漬水中のリン濃度を測定した。常温に浸漬した場合の浸漬水中のリン濃度は0.09mg・L⁻¹であったのに対し、60℃で加熱した場合は3.41mg・L⁻¹であった。およそ40倍近く溶出させることができた。今回の実験によって、ひも状接触担体を用いた方法で下水中の有機物を比較的短時間で除去ができること、リンの回収の可能性もあることがわかった。

キーワード：生物接触酸化法 下水処理 リンの回収

1. 背景と目的

日本などの工業先進国で最も一般的な下水処理法は活性汚泥法である。同法は、設計指針や維持管理方法が十分に確立しているため、経験豊かな技術者の確保が困難な発展途上国でも普及しつつある。しかしながら、活性汚泥法は「活性汚泥」と呼ばれる好気性微生物群を高濃度で維持しながら有機物分解を行う方法であるため、最終的には下水中の有機物が活性汚泥に変換された汚泥(余剰汚泥)は系外に排出・処分しなければならない。余剰汚泥は、別の生物処理法を経て濃縮・脱水して焼却、埋立されている場合が多い。この汚泥処理・処分費は、下水処理施設に必要な運転・維持管理費の中で大きな割合を占めていることから、地方公共団体等の運営組織にとって大きな財政負担となっている。

そこで研究者らは、汚泥発生量が少ないとされる生物接触酸化法に着目し、中小規模の処理施設を対象とした下水処理法について基礎的な検討を行った。生物接触酸化法は、処理効率の点で一般に活性汚泥法よりも劣る技術とされているが、余剰汚泥の発生量が少な

ひも状生物接触担体を用いた下水中の汚濁物質除去とリンの回収（濱崎・西村・松田・村井・鈴木・菅原）

く、比較的運転管理も容易な有機物除去法である。当該研究については2006年度より、ひも状接触担体、球状接触担体、生物活性助材との併用などの基礎的実験を継続して実施し、その結果、ひも状接触担体の有効性を見出すことができた。このひも状接触担体は、有機系産業廃水などの処理を目的として研究・開発が進められてきたもので、し尿処理などへの利用も進められている。

このような背景により、本研究では、このひも状接触担体を用い、反応時間の違いによる汚濁物質の除去特性を見出す室内実験、室内実験の結果を踏まえ、実際の下水処理場において、比較的大型の反応槽を用いた実証的な屋外実験を実施した。また、農業分野ではリンの枯渇が懸念されていることから、農地還元を目的としたリンの回収の基礎的な実験も行った。

2. 実験方法

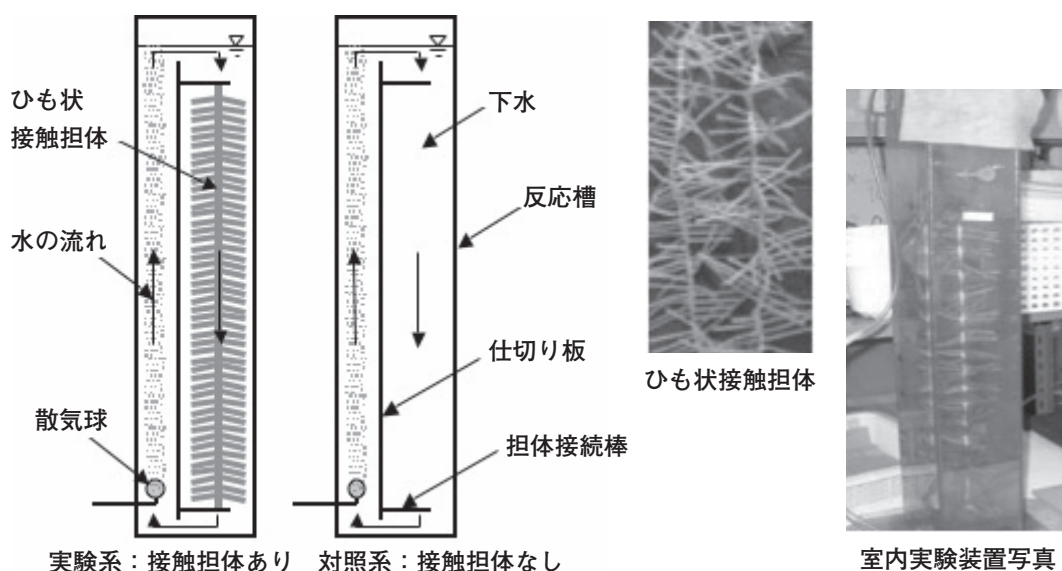
2-1 室内実験

室内実験の装置図及び写真を図-1に示す。実験はひも状接触担体を取り付けた実験系と取り付けていない対照系の2系列で行った。実験装置の反応槽は、高さ800mm、幅150mm、奥行き116mmの亚克力製の直方体で、内部に仕切り板を設けている。仕切り板の下部に散気球が取り付けられ、吐出風量 $6.0\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ のエアープンプを2系列の反応槽に分岐して内部を曝気している。曝気は、溶存酸素濃度維持の目的だけでなく、曝気によって生まれた水流によって、反応槽内部の下水を循環することも目的としている。実験系には図-1のように生物接触担体であるひも状接触担体が上部及び下部の担体接続棒に取り付けられている。ひも状接触担体の長さ（ひも状接触担体の幹部分）は520mmで、左右に45mm長の枝部分の担体が縫いこんである。乾燥重量は520mmに対し11.2gで、幹部分はポリエステル系繊維、枝部分は亚克力系繊維でできている。対照系にはひも状接触担体を取り付けいないが、それ以外の条件は実験系と同様にしている。

実験手順は、上述のように準備したうえで、大阪産業大学中央キャンパス内下水処理施設に流入する下水をそれぞれの反応槽内に11L程度入れ、一定の時間（6時間、24時間、48時間）曝気し、曝気前を原水、曝気後は処理水とした回分式にて複数回実施した。その内、4回の結果をRun-1.1～1.4として示す。実験に供した原水の水質は表-1の通りである。

測定項目は、pH、ORP、EC、DO、BOD、COD、SS、TS、D-N及びD-Pである。COD以外の分析はJISに準拠した方法を採用しているが、CODは重クロム酸カリウムを用いた

Hach社製の簡易分析計を用いて分析した。



図－１ 室内実験 実験装置図及び写真

表－１ 室内実験に供した原水の水質

| 実験No. | pH | ORP (mV) | EC (mS・cm ⁻¹) | DO (mg・L ⁻¹) | BOD (mg・L ⁻¹) | COD (mg・L ⁻¹) | TS (mg・L ⁻¹) | SS (mg・L ⁻¹) | D-P (mg・L ⁻¹) | D-N (mg・L ⁻¹) |
|---------|------|-------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Run-1.1 | 6.96 | -465 | 0.75 | 0.78 | 149 | 349 | 316 | － | 2.9 | 29 |
| Run-1.2 | 7.46 | -191 | 0.55 | 1.31 | 240 | 207 | 260 | － | 2.5 | 33 |
| Run-1.3 | 7.61 | -157 | 0.56 | 2.40 | 75 | 100 | 384 | 49 | 2.5 | － |
| Run-1.4 | 7.62 | -160 | 0.55 | 0.27 | 75 | 51 | 512 | 175 | 2.5 | 26 |

２－２ 屋外実験

室内実験の結果を踏まえ、大阪府内の下水処理場にて屋外実験を行った。実験の写真を図－２に示す。

実験装置の容器は、縦 1 m、横 1 m、高さ 2.5 m の FRP 製で、容器内に 2.0 m³ の下水を入れることができる。この中に室内実験と同様の長さ 870 mm のひも状接触担体が 88 本垂直に取り付けられている。構造は室内実験と類似しているが、内部には、最下部に穴が開いた仕切り板を 2 箇所設けて 3 室とし、中央室の下部に散気管を設置して、2 基のエアープンプによって曝気する仕組みとなっている。2 室の側室にそれぞれ 44 本のひも状接触担体を取り付けられており、側室上部から下部に曝気による水流が得られ、最上部で中央室から側室に越流するようになっている。また、側室下部には傾斜板が取り付けられており、

ひも状生物接触担体を用いた下水中の汚濁物質除去とリンの回収（濱崎・西村・松田・村井・鈴木・菅原）



図－２ 屋外実験 装置写真

循環の効率をあげている。

実施場所は大阪府内の下水処理場であり、下水処理場に流入するスクリーンを通過した未処理の下水を水中ポンプによって容器に導入し、容器内を循環した後、再び下水処理場に返還するようにした連続式実験で実施した。流入量は制御盤により制御することができ、ポンプの稼働を間欠として流入量を変化させた。

測定項目は、水温、透視度、pH、ORP、EC、DO、BOD、COD、SS、TS、D-N及びD-Pである。室内実験と同様、COD以外はJISに準拠した方法を採用しているが、CODは重クロム酸カリウムを用いたHach社製の簡易分析計を用いて分析した。

実験装置への流入量は表－２のように変えて実験を行った。

表－２ 屋外実験の実験条件

| 実験No. | 実験期間 (day) | 流入量 ($\text{L} \cdot \text{day}^{-1}$) | 滞留時間 (hour) | 原水BOD ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) | BOD容積負荷 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{day}^{-1}$) |
|---------|---------------|---------------------------------------------|----------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Run-2.1 | 4 | 2.5 | 18.9 | 152 | 0.19 |
| Run-2.2 | 3 | 4.0 | 12.0 | 148 | 0.30 |
| Run-2.3 | 4 | 6.5 | 7.4 | 146 | 0.47 |
| Run-2.4 | 3 | 8.0 | 6.0 | 183 | 0.74 |

２－３ リン回収実験

屋外実験終了後、ひも状接触担体の一部を取り出し、ひも状接触担体に付着しているリンの回収方法について検討した。実験方法は、屋外実験でBODが $148 \sim 183 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ （平均 $156 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ）の原水をBOD容積負荷が $0.19 \sim 0.74 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{day}^{-1}$ （平均 $0.40 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{day}^{-1}$ ）で14日間使用したひも状接触担体を400mm切り出し、実験系として 60°C に制御された電気炉によって加熱した水500mLに浸漬したもの、対照系として常温（ 20°C 程度）の水

500mLに浸漬したものの2系列における1時間の浸漬水中のリン濃度を測定した。この方法は、Heatphos法と呼ばれる汚泥からのリン回収技術の一つであり、Heatphos法では一般に70℃で1時間加熱する方法が採用されている。

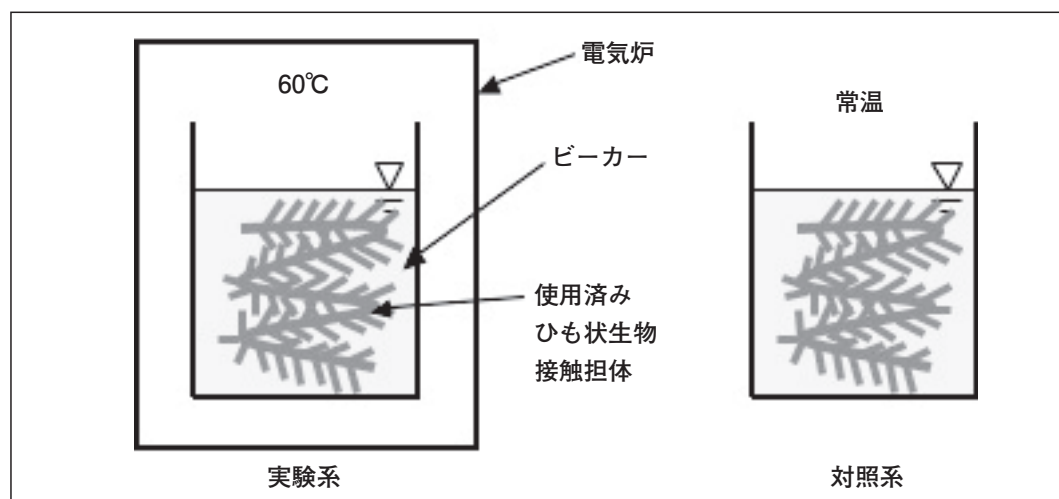


図-3 リン回収実験 実験装置図

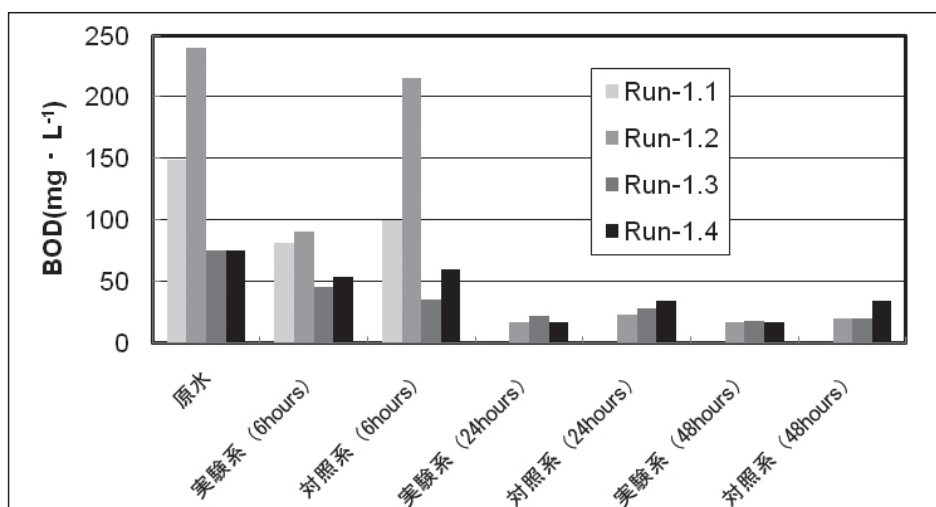
3. 実験結果・考察

3-1 室内実験

室内実験のうち、BOD、COD及びSSの結果を図-4～6に示す。

Run-1.1～1.4におけるBODの平均除去率は、6時間の曝気時間では実験系が44%、対照系が29%で、実験系が対照系よりも高い除去率となり、48時間では、実験系が82%、対照系が73%の除去率を得ることができた。CODの平均除去率は、6時間の曝気時間では実験系が21%、対照系が17%で、実験系が対照系よりも高い除去率となり、48時間では、実験系が62%、対照系が60%の除去率を得ることができた。このようなことから、曝気によって有機物は化学的または生物学的に酸化が促進されることにより分解されるが、ひも状接触担体を用いた実験系は、特にBODにおいて促進されることがわかった。すなわち、ひも状接触担体によって、曝気を短時間に行うことができるため、エネルギー消費を抑制でき、かつ同一の下水流入量であれば施設規模を小さくできる。SS濃度が $175\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ であったRun-1.4におけるSSの除去率は、24時間以上で両系とも94%以上であった。その多くはひも状接触担体や反応槽側面に付着したの多いと考えられるが、曝気時間を長くする

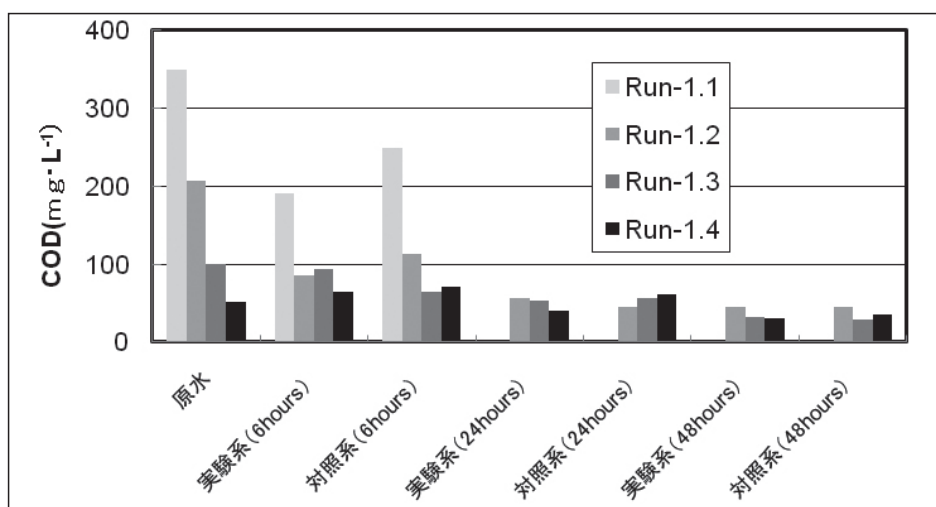
ひも状生物接触担体を用いた下水中の汚濁物質除去とリンの回収（濱崎・西村・松田・村井・鈴木・菅原）



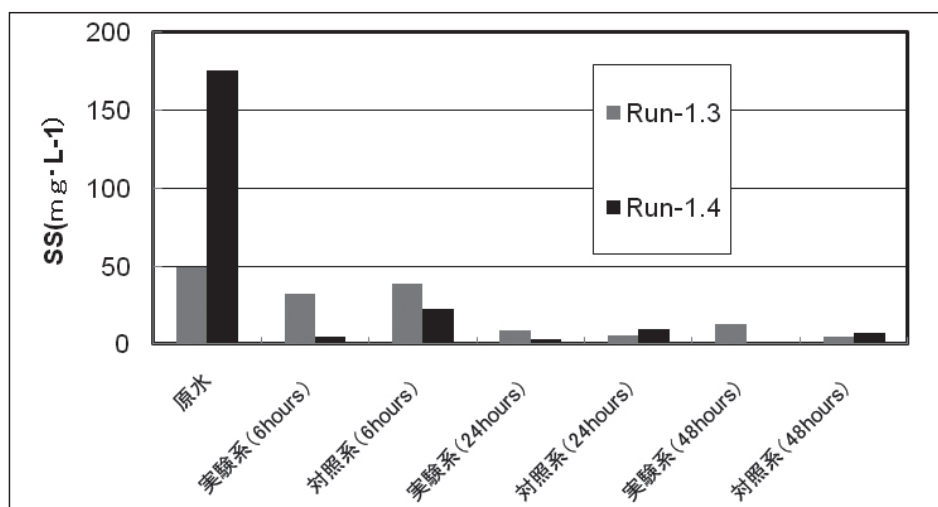
図－４ 室内実験におけるBODの変化

ことによって自己酸化が促進され、SSが減少した部分もあると推察される。なお、pH、ORP、EC、DO、D-P及びD-Nについては、実験系と対照系では大差はなかった。

以上のことから、溶解している窒素やリンの除去は現法ではさらなる検討が必要であるが、有機物の除去は確認することができた。



図－５ 室内実験におけるCODの変化



図－6 室内実験におけるSSの変化

3－2 屋外実験

屋外実験の結果を表－3に示す。

表－3 屋外実験の結果

| 実験No. | | 水温 (℃) | 透視度 (cm) | pH | ORP (mV) | EC (mS・cm ⁻¹) | DO (mg・L ⁻¹) |
|---------|--------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Run-2.1 | 原水 | 23.3 | 4.9 | 7.30 | -142 | 0.44 | 0.33 |
| | 処理水 | 22.7 | 17.5 | 7.47 | 70 | 0.41 | 5.66 |
| Run-2.2 | 原水 | 24.6 | 4.0 | 7.17 | -29 | 0.45 | 0.20 |
| | 処理水 | 24.4 | 18.0 | 7.62 | 30 | 0.40 | 5.50 |
| Run-2.3 | 原水 | 21.7 | 4.9 | 7.35 | -88 | 0.47 | 0.74 |
| | 処理水 | 21.9 | 13.8 | 7.49 | -43 | 0.41 | 4.59 |
| Run-2.4 | 原水 | 21.2 | 4.5 | 6.83 | 41 | 0.40 | 0.31 |
| | 処理水 | 21.7 | 12.1 | 7.53 | 48 | 0.31 | 5.90 |
| 実験No. | | BOD (mg・L ⁻¹) | COD (mg・L ⁻¹) | TS (mg・L ⁻¹) | SS (mg・L ⁻¹) | D-P (mg・L ⁻¹) | D-N (mg・L ⁻¹) |
| Run-2.1 | 原水 | 152 | 445 | 192 | 166 | 2.5 | 25.1 |
| | 処理水 | 87 | 125 | 188 | 46 | 2.3 | 26.8 |
| | 除去率(%) | 43 | 72 | 2 | 72 | 8 | -7 |
| Run-2.2 | 原水 | 148 | 512 | 596 | 244 | 2.1 | 24.0 |
| | 処理水 | 119 | 124 | 324 | 26 | 2.4 | 27.9 |
| | 除去率(%) | 20 | 76 | 46 | 89 | -14 | -16 |
| Run-2.3 | 原水 | 146 | 495 | 680 | 256 | 2.3 | 34.0 |
| | 処理水 | 40 | 260 | 572 | 70 | 1.9 | 23.8 |
| | 除去率(%) | 73 | 47 | 16 | 73 | 17 | 30 |
| Run-2.4 | 原水 | 183 | 613 | 640 | 234 | 2.6 | 34.6 |
| | 処理水 | 64 | 203 | 356 | 78 | 2.8 | 24.8 |
| | 除去率(%) | 65 | 67 | 44 | 67 | -8 | 28 |

ひも状生物接触担体を用いた下水中の汚濁物質除去とリンの回収（濱崎・西村・松田・村井・鈴木・菅原）

Run-2.1から徐々に原水流入量を増加させ、Run-2.4ではRun-2.1に対して原水流入量で約3倍、BOD容積負荷では約4倍に変化させた。Run-2.2のBOD除去率を除けば、BOD及びCODは43～76%の除去率であった。SSは67～89%除去できた。残念ながらD-PやD-Nは、原水濃度より上昇した場合があり、また高くても30%の除去率しか得ることができなかった。

いずれの結果でも処理水のBODは $40\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上であり、このまま公共用水域に放流できる水質ではないが、Run-2.4はRun-2.1と比較して滞留時間がおおよそ1/3でありながら、BOD除去率65%、COD除去率67%、SS除去率67%であったことから、滞留時間は6時間程度でも十分であることがわかった。しかしながら、実験は14日間と短期間であり、十分な馴養期間を得ていないため、本研究の結果だけで評価できない。今後、長期的な実験を試みる必要がある。

3-3 リン回収実験

常温（20℃程度）に浸漬した場合の浸漬水中のリン濃度は $0.09\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ であったのに対し、60℃で加熱した場合は $3.41\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ であった。およそ40倍近く溶出させることができた。このようなことから、微生物とともにひも状接触担体に付着したリンは相当量含有していることがわかる。近年、生物処理によって発生する余剰汚泥からのリンの回収について様々な方法が検討されているが、今回実施したリン回収実験のような簡単な方法によってもリンを回収する可能性があることがわかった。ただし、屋外実験に供した原水のD-Pは $2.5\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 程度であり、それと比較すればリンを十分に濃縮しているとは言い難いことから、さらに条件を変えながら安価で簡単なリンの回収方法を検討することにする。

4. まとめ

今回の実験によって、ひも状接触担体を用いた方法で下水中の有機物を比較的容易に分解除去できること、リンの回収の可能性もあることがわかった。しかしながら、下水中の窒素やリンなどの栄養塩類の除去については課題があり、また最終処理水の有機物濃度も公共用水域に放流するにはまだ高いため、単独にて運用するにはさらなる検討が必要なことがわかった。

今回、試みた生物接触酸化法は活性汚泥法とは違い、微生物を接触担体に担持させており、大量の微生物群（活性汚泥）を曝気槽（反応槽）に用いていない方法である。大きな負荷への対応は、活性汚泥法が優れているが、生物接触酸化法は、元々活性汚泥を曝気槽

(反応槽)に投じていないことから、必然的に汚泥発生量が少なくなる。

好気性従属栄養生物は外部からの有機物を栄養源とし、酸素を消費しながら増殖と死滅を繰り返す過程とともに、生存のための代謝としても有機物を分解している。活性汚泥法は、生物活動の中の増殖とその排除に重点をおいた有機物除去法である。一方、生物接触酸化法は、自己酸化を含む増殖、死滅及び代謝のバランスを取りながら有機物の分解を行う方法である。高効率ではないものの、余剰汚泥の処理費用、または環境への負荷という点で利点があると言える。このようなことから、より効率的に生物活動を維持する方法を見出せば、生物接触酸化法も産業廃水や河川の直接浄化だけでなく、下水処理などにも適用できると推察される。

一方、リンの回収は今後の食料確保といったグローバルイシューに直結する課題である。リンは環境分野では除外したい物質でありながら、農業分野では枯渇可能性物質である。旧来、人間の排せつ物を農地に還元するという循環型社会が形成されていたが、現在は、その社会はほとんど崩壊し、輸入に頼っているというのが現状である。このような農業でのリン利用を継続すれば、100年も経たない間にリンが枯渇すると言われている。この矛盾を打破する方法の一つとして、下排水中のリンを農地に還元する容易な方法を確立することが考えられる。

本研究によって、ひも状接触担体による下水処理とその方法によるリンの回収の可能性を確認することができた。今後は、長期的な屋外実験を実施して、継続的な除去性能、汚泥の減量化、リンの回収方法、他の技術との組み合わせによる高度処理に関する研究を実施する予定である。

参考文献

- 1) 山内一志, 生物接触担体を用いた生物膜法による下水処理に関する研究, 大阪産業大学大学院修士論文, 2007
- 2) 産業環境管理協会, 新公害防止の技術と法規2008水質編
- 3) 西村昌次, リュウロ, 菅原正孝, 濱崎竜英, 生物接触酸化法による下水処理の基礎的検討, 第9回環境技術学会研究発表会, 2009
- 4) 黒田章夫, 滝口昇, 加藤純一, 大竹久夫, リン資源枯渇の危機予測とそれに対応したリン有効利用技術開発, 環境バイオテクノロジー学会誌, 2005