

閉鎖性水域の富栄養化防止のための 高効率窒素・リン同時除去法による下水処理

研究代表者 九州大学大学院工学研究院 准教授 久場 隆広

1. 下水からのリン除去と循環資源としてのその回収の必要性

湖沼や内湾等の閉鎖性水域の富栄養化問題は 20 世紀末の最も重要な水環境問題であったが、21 世紀においても依然としてその解決の糸口が見えてこない。様々な非点源汚染について対策がなされているとは云い難いし、点源汚染対策についても不十分である。富栄養化問題に対する下水道サイドの対策としては窒素やリンの高度処理が挙げられるが、大都市はまだしも、経済的な諸事情等から中小都市ではほとんど普及していない。大都市においても、種々の物理化学的手法や生物学的手法の中から低コストで、安定して高度処理を達成可能なシステムの開発を模索している状況にある。

例えば、背後に福岡市という大都市を抱えた博多湾では、近年、赤潮の発生や貧酸素水塊の発生が毎年のように報告されるようになった。福岡市の下水道は、昭和 38 年からの第 1 次下水道整備 5 箇年計画として本格的な整備が開始され、現在の下水道普及率は 99.4%、下水道処理人口は 139 万人、農業・漁業集落排水処理を含めた汚水処理人口普及率は 99.7% である (2005 年度末)。このように下水道はほぼ完全に整備されていることから、現在の福岡市の下水道整備計画 (2005~2008) では、浸水対策・水洗化区域の拡大・合流式下水道の改善・高度処理推進・老朽施設の改築更新などを重点項目として事業が推進されている^[1]。博多湾岸の 5 つの下水処理場 (西部・中部・東部・和白・西戸崎水処理センター) では、凝集沈殿法あるいは嫌気-好気法によるリン除去が既に導入されている。博多湾の水質環境基準を見てみると、T-P に関しては年々減少しており、いずれの基準点においても環境基準値を下まわっている。一方、T-N に関してはほぼ横ばいの状況であり、基準値をわずかに下まわっている状況が続いている。また、全ての流入河川の BOD についての環境基準は達成されているにもかかわらず、博多湾の COD に関してはほとんどの地点で環境基準が達成されておらず、逆に微増の状況が続いており、富栄養化が進行していることがうかがえる^[2]。したがって、今後、下水処理場での窒素除去の導入が必要であるとされており、窒素・リン同時除去の施設整備に向けた調査が福岡市によって実施されている^[1]。ステップ流入法による窒素除去法や、付着型硝化生物膜を導入した嫌気-無酸素-好気法 (A₂O 法) による生物学的リン・窒素同時除去法などの研究・調査が進められ、経済的で効果的な高度処理法が模索されている。

一方、資源の循環利用の観点からもリンは注目されている。作物の成長に不可欠な肥料の三大栄養素である窒素・リン・カリウムのうちで、最も資源の枯渇が懸念されているものがリンである。リンは、あらゆる生物にとっての必須元素でもある。リンはガス態物質を形成しないため、生物と土壌間での局地的な循環を形成している。基本的には陸域から海域へ流失・拡散していくために、陸域においてその枯渇が懸念されている。作物生産などの農業においては、多くの場合、リンを含むリン酸が肥料として散布される。リン酸の最大の供給源はリン鉱石であるが、世界のリン鉱石の埋蔵量は 140~180 億トン

程度、埋蔵基礎量 (将来、技術の進歩により採掘が見込める量) は約 500 億トンと云われている^{[3], [4]}。一方、現在の年間のリン鉱石生産量は 1.3~1.5 億トンであることから、可採年数は約 100 年であると見積もられるが、人口の増加や肥料利用量の増加によって、21 世紀中盤には枯渇するのではないかと云われている。この農業に不可欠なリン鉱石の日本の埋蔵量はほぼ 0 トンであり、完全に輸入に依存している。最大の輸入先は中国であるが、近年、その輸入価格が高騰しており、日本の農業関係者に大きな危機感をもたらし、食糧生産に大きな打撃を与えている。したがって、リン資源の乏しい日本においては、近年、リン資源枯渇の危機予測やリンの有効利用技術、リンの回収・再資源化に関する多くの研究がなされるようになった^{[3], [4]}

下水道には、日本に輸入されるリン鉱石のうちの約 1~2 割に相当するリンが流入している^[5]。下水からのリン除去によって閉鎖性水域の富栄養化を抑制すると同時に、その回収・再資源化・循環化によってリン資源の枯渇の問題を回避できる可能性がある。

2. 研究の目的

下水からのリン除去については、余剰汚泥発生量の観点からは、凝集沈殿法といった化学的処理よりも生物学的な処理の方が有利である。一方で、低温期や雨天時に処理の安定性が低下するなどの問題点はあるが^[6]、本研究では、生物学的リン除去を研究対象とする。窒素の同時除去を可能とするため、また、発生汚泥量やリン除去のための曝気量の抑制のために脱窒性脱リン細菌を高濃度に集積する方法を利用する。その際、硝化液の循環や嫌気槽への循環を可能な限り抑制すると同時に、リン除去を活性化させるための外部からの有機物添加を必要とせず、下水中の有機物を最大限に脱リン及び脱窒のために利用可能なシステム、即ち、非循環式硝化-内生脱窒脱リン法 (Dephanox 法) について検討する。現在、脱窒性脱リン細菌は単離されていないことから、活性汚泥中での挙動や脱窒性脱リン汚泥の菌叢についての検討も行った。さらに、脱窒により窒素を除去しつつ、脱リンにより高リン含有率の活性汚泥を形成させ、その汚泥からのリンの回収及び再資源化を行うことを目指し、その基礎的検討も実施した。

3. Dephanox 法による脱窒性脱リン ～処理の安定性と雨天時下水が及ぼす影響について～

循環式硝化-脱窒法に嫌気槽を導入した従来法の A₂O 法や UCT 法では、脱窒菌と脱リン菌がそれぞれ個別に窒素とリンを除去している。下水中の有機物量は限られており、有機物量が律速となるために、不完全な窒素あるいはリンの除去が起こる。一方、脱窒性脱リン細菌は硝酸塩を電子受容体として利用でき、嫌気-無酸素条件の下でリン除去活性を示す。したがって、脱窒と脱リンの両反応を 1 種の菌で担い、有機物の有効利用を図ることができる。この脱窒性脱リン細菌を有効に機能させる手法として非循環式硝化-内生脱窒脱リン法を我々は提案している^{[7], [8]}。ここでは、その手法を導入した Dephanox 型システムを実下水に適用し、窒素およびリンの除去の安定性を検証する。同時に、雨天時及び雨天後において高度処理施設でのリン除去機能が長期に渡り低下することから、雨天時下水の及ぼす影響についても検討した。

3.1 Dephanox 法による脱窒性脱リン

本法では、一般の生物学的リン除去プロセスと同様に、前段の嫌気槽で有機物の摂取とリンの放出が行われる。次いで内部沈殿池で脱窒脱リン汚泥は固液分離され、上澄液中に含まれるアンモニア性窒素が硝化槽へ送られる。硝化槽では担体に付着した硝化菌によって硝酸が生成され、硝化液のみが無酸素槽に供給される。一方、汚泥は硝化槽をバイパスされるために好気条件に曝されることなく無酸素槽へと移行し、硝化槽から送られてくる硝酸を利用して脱窒性脱リンが行われる。最終段の好気槽は付着気泡による汚泥の浮上防止と処理水の嫌気化防止を目的として設置され、滞留時間は短く設定されている。

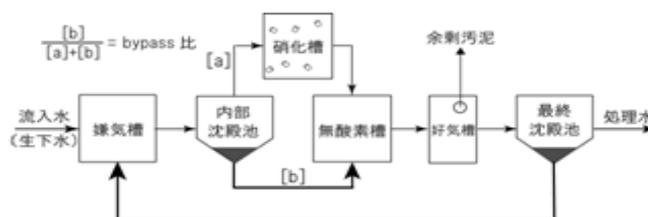


図-1 Dephanox 型システムの概要

このように、Dephanox 法では、汚泥が嫌気-無酸素条件に保たれることで高濃度に脱窒性脱リン細菌が集積され、細胞内有機物 (PHA) を好氣的に空費することなく脱窒脱リン可能である。同時に、比増殖速度が遅く好氣的汚泥滞留時間を長く保つ必要がある硝化菌を脱窒性脱リン細菌と独立して維持・管理でき、A₂O 法といった前脱窒法 (循環式硝化-脱窒法) に必要な硝化液の循環も不要である。また、施設面積の抑制とともに、有機酸生成を活発にして脱窒性脱リンを促進するために、最初沈殿池を省略して生下水を利用している。

3.2 実験方法

Dephanox 型実験装置を前原下水管理センター (分流式) に設置し、生下水を連続的に供給した。表-1 に運転条件を示す。硝化槽には、硝化菌を付着させたポリプロピレン製担体 (中空タイプ、外径 4 mm (内径 3 mm)×5 mm) を容積比で約 15% 投入した。また、高い硝化活性を維持するために 22°C を下回らないように、硝化槽についてのみ温度制御を行った。day28 から SRT20 日として余剰汚泥の引き抜きを開始し、MLSS を 2000mg/L 前後で運転した。

生下水 Q_1 と水道水 Q_2 を同時に流入させ、雨水混入による希釈下水を想定した。その際、流入量 $Q = Q_1 + Q_2 = 110\text{L/d} = 4.58\text{L/h}$ (一定) とし、希釈倍率を変化させた。実験条件を表-2 に示す。希釈下水の流入開始時間は午前 9 時である。

表-1 Dephanox 型システムの運転条

| | | | |
|------------|------|---------|------|
| 流入水量[L/d] | 110 | 嫌気槽[L] | 12.1 |
| 余剰汚泥量[L/d] | 1.84 | 硝化槽[L] | 14.0 |
| HRT[hour] | 12 | 無酸素槽[L] | 19.6 |
| SRT[day] | 20 | 好気槽[L] | 5.0 |
| bypass比 | 0.13 | | |
| 汚泥返送比 | 0.2 | | |

3.3 Dephanox 型システムの処理の安定性

流入下水及び処理水の平均水質を表-3 に示す。最終沈殿池の構造上の問題によ

表-2 雨天時下水流入実験の条件

| | 希釈倍率 | 濃度(%) | 流入時間(h) |
|-------------|------|-------|---------|
| RUN1(day49) | 1.25 | 80 | 3 |
| RUN2(day54) | 1.5 | 67 | 3 |

て処理水中の SS 濃度がく、

表-3 流入下水及び処理水の平均水質 (day41~day65)

| | SS | COD | DOC | T-N | NO ₃ ⁻ -N | NO ₂ ⁻ -N | NH ₄ ⁺ -N | T-P | PO ₄ ³⁻ -P |
|-----|----|-----|------|------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----|----------------------------------|
| 流入水 | 80 | 394 | 50.6 | 49.3 | <0.1 | <0.1 | 33.9 | 5.4 | 2.8 |
| 処理水 | 50 | 116 | 6.1 | 9.8 | 3.2 | 0.44 | 1.2 | 1.9 | 0.2 |

COD や T-N、T-P の濃度も若干高い値を示している。処理水中の三態窒素の残存量は bypass 比 $([b]/([a]+[b]))$ 、図-1) により規定される。これは、一部の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ が内部沈殿池から汚泥(図-1の[b])とともに無酸素槽に流入することが原因である。

bypass 比は、無酸素槽に流入する $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 量と汚泥による同化量とのバランスを考慮した上で管理されるが、無酸素槽 MLSS 濃度や嫌氣的 SRT にも影響を与え、窒素・リンの同時除去には 0.08~0.13 が適切である^[9]。

各槽での $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 及び DOC 濃度の挙動を図-2 に示す。嫌気槽での有機物の摂取に伴い、リンが放出され、無酸素槽ではリンが過剰摂取されている。実下水を用いて、このように明確な脱窒脱リン現象が安定して確認された。

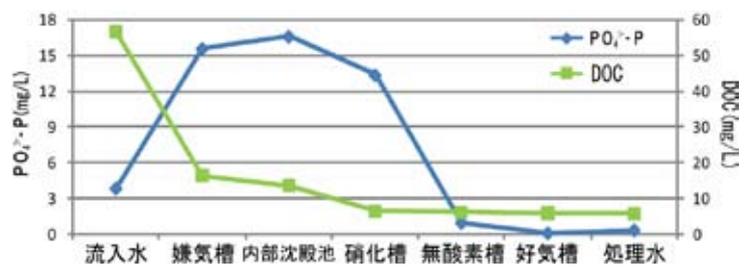


図-2 各槽での $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、DOC 濃度 (day55)

3.4 雨天時下水が及ぼす影響

前原下水管理センターは分流式下水道を採用していることから、雨天時において高率に希釈された下水が流入することはあまりないが、本法の処理性能は雨天時においても安定していた。

day48 に各槽のリン濃度の経時変化を把握した(Blank)後に、希釈下水流入実験 (RUN1、2) を行った。図-3 に示すように、嫌気槽においては希釈下水流入直後からリン放出濃度が低下し、無酸素槽においては流入開始から約4時間経過した後にリン摂取が若干悪化した。処理水中のリン濃度は 0.4mg/L 未満で推移したことから、RUN1、2 の実験

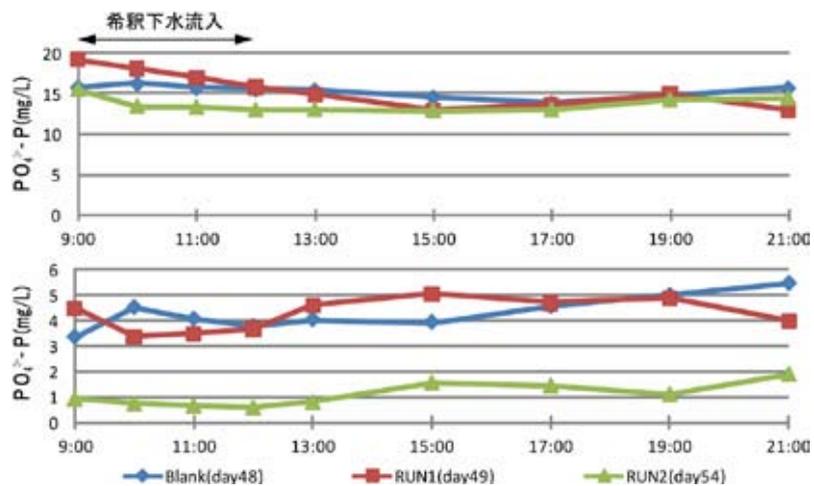


図-3 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度変化:(上)嫌気槽、(下)無酸素槽

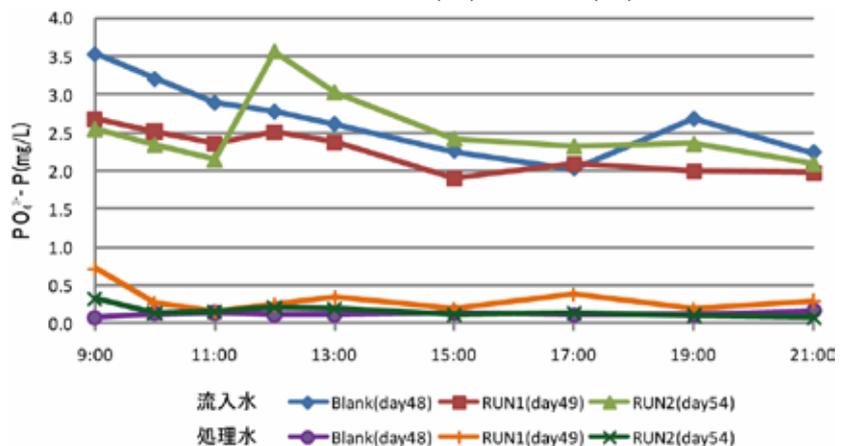


図-4 流入下水と処理水の $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度変化

条件下では、リン除去に影響はなかったと云える (図-4)。一方、図-5より、RUN2 の処理水中の三態窒素濃度は流入開始から6~12時間 (水理学的滞留時間 HRT と同程度) 後に数倍まで一旦悪化した。したがって、脱リンよりも脱窒過程が雨天時下水流入の影響を受けやすいことが示唆された。ただし、脱窒現象が不安定な期間であった Blank や RUN1 でも、窒素除去の若干の悪化が見られた。

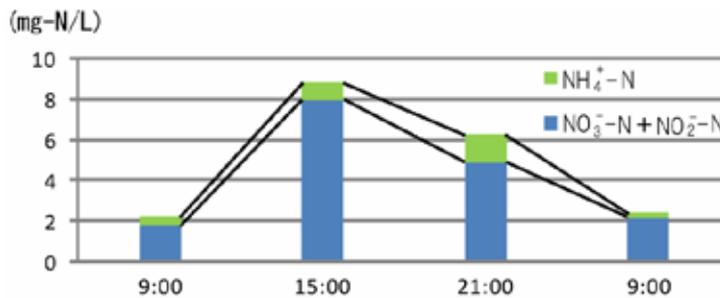


図-5 処理水中の三態窒素濃度の変化 (RUN2)

4. 嫌気-無酸素活性汚泥の微生物群集構造解析

～単離を可能にする脱窒性脱リン細菌群の高濃度集積手法の開発～

生物学的リン除去可能な活性汚泥の中で、特に重要となるリン除去を担う微生物 (PAOs: ポリリン酸蓄積細菌) やそれを阻害する微生物 (GAOs: グリコーゲン蓄積細菌) の処理システム内での挙動については不明な点が多い。本研究では、酢酸とプロピオン酸を唯一の炭素源として交互に添加する方法^[10]を用いて、脱窒性 PAOs (DN-PAOs) の高濃度集積を目指したスクリーニング装置を運転した。得られた集積汚泥を用いて DN-PAOs を単離し、その代謝を明らかにし、さらに、その微生物学的知見を得ることを最終的な研究目標としている。ここでは、高濃度集積を試みるとともに、FISH (Fluorescence *in situ* hybridization) 法を用いて、スクリーニング装置と様々な条件で運転された他の装置内の微生物群集構造とを比較し、炭素源の交換による菌叢の変化や各条件下での PAOs の占有率の違いについて検証した。

4.1 実験方法

福岡市西部水処理センターの A/O 法の好気槽より採取した種汚泥を遠心分離装置によりプロピレン製付着固定化担体に定着させた。その担体を、図-1 に示すスクリーニング装置本体に投入し、嫌気工程 2 時間、無酸素工程 4 時間の 1 サイクル 6 時間の嫌気-無酸素連続回分条件下で培養した。スクリーニング装置に流入する唯一の炭素源として、嫌気工程用基質に酢酸とプロピオン酸を約 3 週間ごとに交互に添加した。これは、プロピオン酸を用いることで GAOs と考えられている *Competibacter* の増殖が抑制されるという報告^[10]を基にした。また、無酸素工程用基質には酢酸・プロピオン酸の代わりに硝酸塩を添加した。

菌叢の変化を遺伝子工学的手法により解析するために、各回、嫌気工程用基質内の炭素源を交換する直前にスクリーニング装置内より汚泥をサンプリングした。このサンプルに FISH 法を施して装置内の微生物群集構造解析を行った。蛍光プローブに BET42a および PAO651、RHX991、

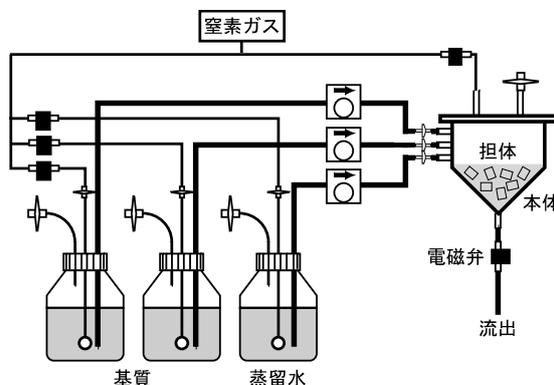


図-6 スクリーニング装置

GAM42a、GAOQ989を用いた。全菌についてはDAPI染色を用いた。全菌に対して、各グループで染色された菌の割合を算定した。

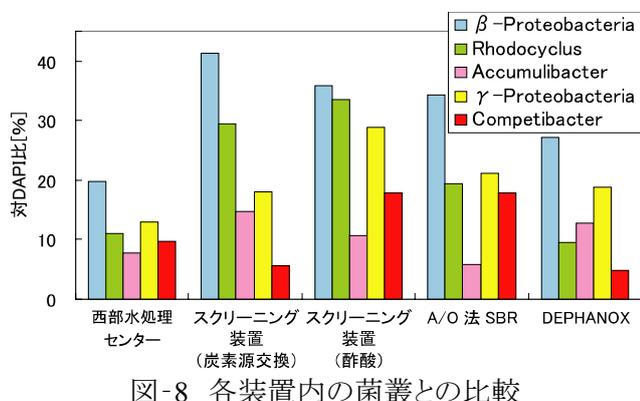
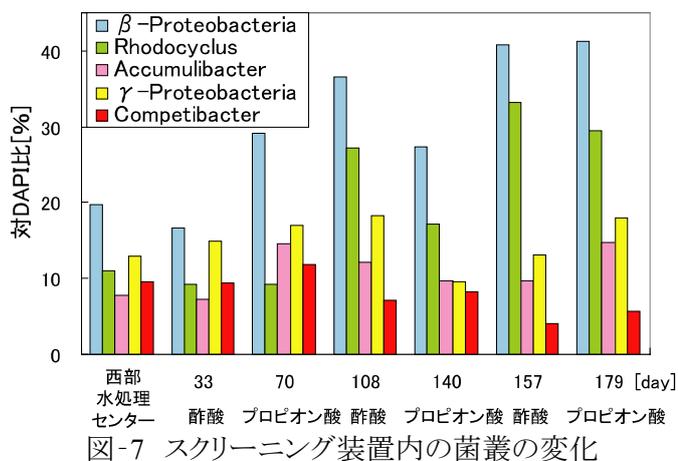
4.2 スクリーニング装置内での DN-PAOs の脱窒脱リン活性

酢酸あるいはプロピオン酸を添加したスクリーニング装置内の汚泥の代謝活性を観察した。炭素源の違いによる活性の大きな違いは見られなかった。嫌気条件下で各有機物が摂取されるとともに明確なリンの放出が確認され、それに続く無酸素条件下では硝酸塩濃度の低下とリンの摂取が確認された。すなわち、脱窒条件下での明確なリン除去が認められたことから、DN-PAOs が装置内に集積されていることが分かった。

4.3 スクリーニング装置内の菌叢の遷移と各種装置内の菌叢との比較

スクリーニング装置内に存在する各菌の全菌に対する占有率の変遷を図-7 に示す。装置運転開始から炭素源交換までの約30日は各菌の占有率に大きな変化は見られなかったが、その後の炭素源交換に伴い β -Proteobacteria 網の占有率の増加が見られた。また、主要な PAOs とされる *Rhodocyclus* 属の増加、GAOs と考えられる *Competibacter* の減少も確認された。このことから、炭素源を交換することによる装置の運転が PAOs の集積と、それに伴った GAOs の排除に効果的であると考えられる。しかしながら、Luらは炭素源交換により PAOs が9割以上集積されると報告しているが^[10]、本研究では、3割程度にとどまった。PAOs の集積および GAOs の排除が予想以上には達成されていない理由については、 α -Proteobacteria 網 *Defluviicoccus vanus* 種 (DvGAOs) の存在が考えられる。DvGAOsは酢酸とプロピオン酸の両方を有機物として摂取可能な菌である^[11]。この DvGAOs が増殖し、PAOs の増殖を抑制しているのかもしれない。

また、スクリーニング装置内の菌叢を様々な条件で運転する他種の装置内の菌叢と比較した結果を図-8 に示す。次の5つの菌叢の比較を行った：①スクリーニング装置の種汚泥として用いた西部水処理センター (A/O 法) 内の嫌気-好気活性汚泥、②炭素源交換を行った嫌気-無酸素スクリーニング装置内の汚泥、③福岡市東部水処理センター (A₂O 法) の汚泥を種汚泥とし、酢酸のみを炭素源として運転したスクリーニング装置、④スクリーニング装置と同じ種汚泥を添加し、嫌気-好気条件下で酢酸を用いた SBR 装置内の汚泥、⑤外部硝化型嫌気-無酸素条件下で実下水を用いた Dephanox 装置 (非循



環式硝化-内生脱窒脱リン法、本稿の第3章参照)の汚泥、である。炭素源交換による運転を行ったスクリーニング装置(②)で β -Proteobacteriaの占有率が最も高くなった。*Competibacter*の占有率は、酢酸のみを用いたスクリーニング装置(③)やA/O法SBR(④)と比べて大幅に低い値となった。運転条件の違いはあるが、酢酸とプロピオン酸を交互に添加する手法によりDN-PAOsの集積とGAOsの排除が同時に達成されることが示唆された。

5. 下水からのリン資源回収プロセスが生物学的リン除去プロセスに与える影響

下水からのリン回収は多くの場合、過剰にリン摂取させた余剰汚泥からそれを一旦放出させ、あるいは、物理・化学的に抽出して行われている。例えば、余剰汚泥から実際にMAP法により化学的にリン回収を行っている福岡市西部水処理センターについて、リン収支を試算した。その結果を図-9に示す。

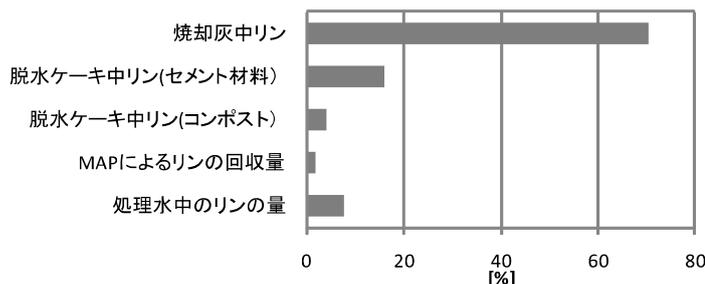


図-9 西部水処理センターにおけるリンの収支

西部水処理センターでは、流入するリンの6割以上が焼却灰に混入し、脱水ケーキ中のリンを合わせると9割以上がリン資源としては有効に活用されていない。そのため、余剰汚泥へのリン混入を削減することが必要であり、それに加え、余剰汚泥以外の新たなリン回収プロセスの開発も視野に入れる必要がある。本研究では、A/O法やA₂O法などの嫌気槽において放出されるリンの一部を資源として回収することを想定した。一方、リンの回収に伴い活性汚泥中のリン含有率が減少し、生物学的な有機物の摂取やリン除去が阻害される可能性がある。そこで、リンの回収・資源化を行う上で安定した処理水質が得られることが重要であるため、ここでは、A/O法の嫌気槽においてリン回収を適用した場合について、それが処理水質に与える影響の検討を行った。

5.1 実験方法

実験には、有効容量は4Lの嫌気-好気連続回分反応槽(A/O法SBR)を用いた。反応槽内の水温を25℃、pHを7.2±0.2、DOを4.0ppm以上に維持した。SRTは15日である。1サイクルの処理時間は6時間であり、嫌気工程(流入時間4分を含む120分)、好気工程(210分)、沈殿工程(25分)、排出工程(5分)からなる。流入水には人工下水を用い、その炭素源としては酢酸ナトリウムを用いた。COD濃度は400mg/L、当初のリン濃度は10mg/Lである。

本研究では、A/O法の嫌気槽においてリンの回収を仮想的に行うこととした。すなわち、A/O法SBRの嫌気工程において生物学的に放出されたリンの一部を回収することを、流入人工下水のリン濃度を削減することによって表現した。リン回収に伴う汚泥のリン含有率の低下を、流入水中のリン濃度を低下させることで実現した。リン回収量の増加を仮想するために徐々に流入水中のリン濃度を低下させ、それに伴う処理水質の変動、すなわち、下水からの生物学的リン除去に与える影響を検討した。phase 1では、初期リン濃度を10mg/Lとした。phase 2, 3では、人工下水のリン濃度を初期濃度に対して25%、50%削減し、それぞれ7.5、5mg/Lとした。また、各phaseについて約15日間運転した。

5.2 A/O 法 SBR の生物学的リン除去活性

図-10、11 に、MLSS および MLVSS 濃度、処理水質の経日変化を示す。day27 以降、処理水中の T-P、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、SS 濃度は安定している。また、処理水中の SS が平均 4.5mg/L であり、汚泥の沈降性も良好であった。phase 1 から phase 2 へ流入水のリン濃度を 75%に削減しても処理水質に大きな変化はなく、良好な処理水質が保たれた。本実験条件下では、流入水の初期リン濃度 10mg/L に対して 25%までリン回収を行ったとしても、安定した処理水質を得ることが可能であった。

図-12 に、phase1 および phase2 の 1 サイクルにおける $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度と有機物濃度の変化を示す。phase1 と比較して、リン回収の仮想的適用によって流入するリン濃度を 25%削減した phase2 では、嫌気工程で放出された $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度が 20mg/L 程度減少していた。しかしながら、有機物の摂取活性や処理水質には大きな変化はなく、安定した代謝活性が維持されていた。

5.3 リンの放出・摂取活性とリン含有率

図-13 に、リン放出・摂取能の経時変化を示した。リン放出能は、phase の経過に伴い減少している。これは図-14 に示す嫌気工程終了時の $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度の変遷、また、図-15 に示す汚泥中のリン含有率の変遷と概ね一致している。一方、リン摂取能は 0.012 [mg-P/mg-MLSS]程度で変動は無く、好気終了時の水質も良好であった。ここで、リン放出・摂取能については嫌気・好気工程開始 30 分間における $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度の変化量を MLSS で除した値を用いた。

津野ら^[12]は、嫌気槽でのリン回収を行った際、過剰なリン回収により処理水質が悪化したことを報告している。その際のリン含有率は 1.7%であり、さらに、津野らは良好な処理水質を得るためには、リン含有率をおよそ 3%として運転する必要があることも報告している。本研究では、図-15 に示すように phase の経過に伴いリン含有率が減少しているが、4%以上の十分なリン含有率が維持されていた。そのため、良好な処理水質が得られたと考えられる。さらに、図-15 から、リン含有率の実験値と理論値 (増殖収率 $Y_g = 0.48$ [g-MLSS /g-COD] を仮定) を比較したとこ

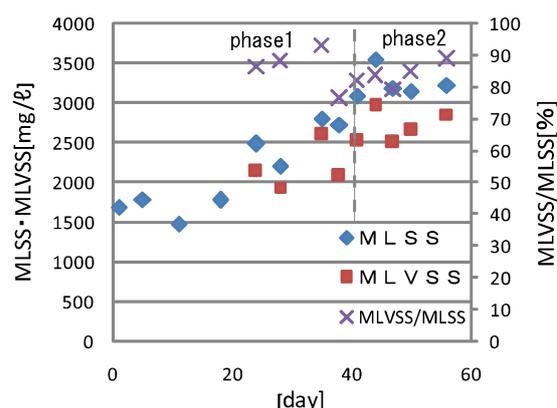


図-10 MLSS および MLVSS、MLVSS/MLSS 比の経時変化

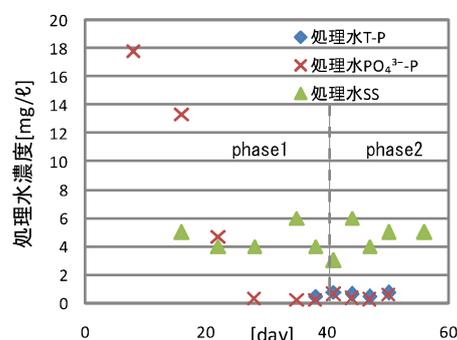


図-11 処理水中の T-P、および、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、SS の経時変化

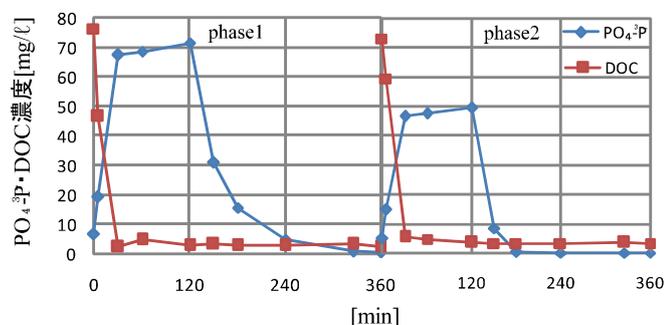


図-12 1 サイクルにおける $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ および DOC の挙動: (左)phase 1、(右)phase2

ろ、各 phase 終了時に両者がおおよそ合致していることがわかる。phase3 での理論値が 2.5%程度であると算定され、したがって、phase3 では水質が悪化することが推測された。ここに、データは示していないが、phase 3 に移行して約 2 週間後から、急激にリンの代謝活性が失われた。phase 2 では、図-8 に示されているように、GAOs と考えられる *Competibacter* が 2 割程度であったが、phase 3 では、PAOs のリン含有率が減少したために、急激に菌叢が変化したと推察され、GAOs が大きく優占したのではないかと思われる。

6. 結論

本実験から以下の結論が得られた。

- (1) 実下水を適用した Dephanox 法において、脱窒性脱リン細菌による安定した窒素・リン同時除去が可能であることが確認された。実際の雨天時においても、その安定性は失われなかった。一方、7~8 割程度に希釈された下水の流入（流入時間 3 時間）はリン除去にはほとんど影響をおよぼさないが、一方、窒素除去に対して若干の影響がみられた。しかしながら、流入後、長くとも 24 時間後には窒素除去は回復した。
- (2) FISH 法を用いて嫌気-無酸素スクリーニング装置内の汚泥についての微生物群集構造解析を行った。炭素源を交換することによって DN-PAOs の高濃度集積、ならびに、GAOs の排除が達成される可能性が示された。特に、プロピオン酸による *Competibacter* の排除効果は大きなものと考えられる。
- (3) 流入リン濃度 10 mg/L に対して 25%のリン資源回収を仮想的に適用したところ、嫌気条件下で放出されるリン濃度に若干の変動が見られたものの、処理水質は概ね安定していた。その際のリン含有率は 4%程度であった。さらに、リン回収率を高めたところ、リン含有率は 2.5%程度となり、リン除去活性は極端に低下した。今後のさらなる検討が必要ではあるが、

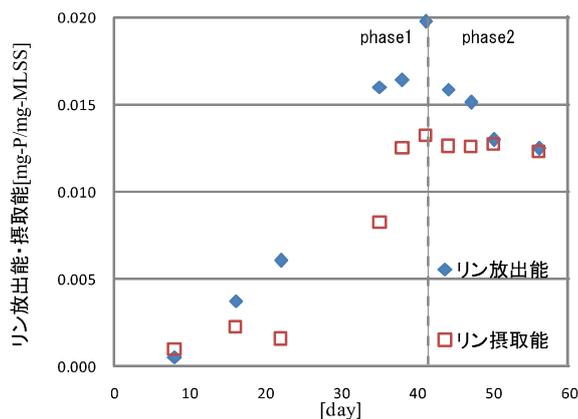


図-13 リン放出・摂取能の変化

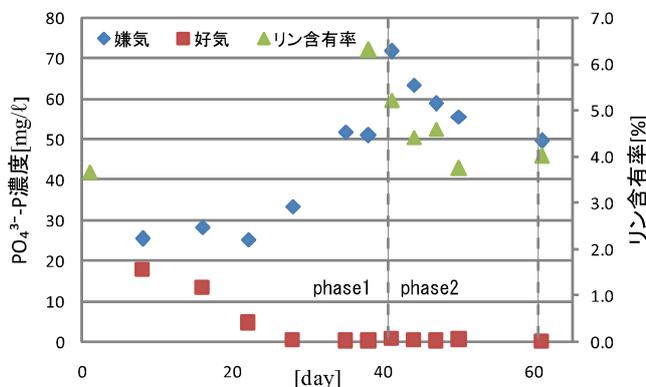


図-14 嫌気・好気終了時の $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度、リン含有率の変化

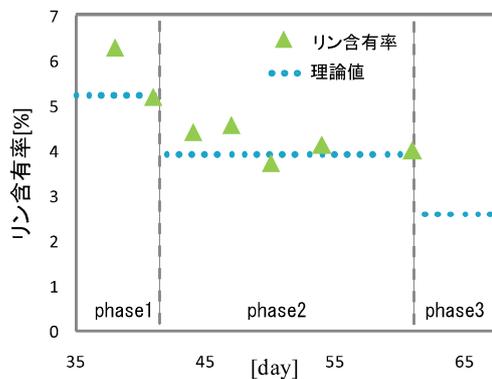


図-15 リン含有率の実験値および理論値

その理由としては、GAOs の急激な寡占が起こったことが推察された。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、工学部地球環境工学科建設都市工学コース 4 年の足立匡・大久保武志・山下智彰、および、大学院工学府都市環境システム工学専攻修士 1 年の永瀨慶彦の各氏に実験および結果のとりまとめを実施してもらいました。ここに、記して謝意を表します。

参考文献

- [1] 福岡県 (2007) 平成 18 年版福岡県環境白書、pp.84-86
- [2] 福岡市下水道局 (2007) <http://gesui.city.fukuoka.jp/>, <http://gesui.city.fukuoka.jp/business/about/transaction.html>
- [3] 大竹久夫、黒田章夫、滝口昇、加藤純一 (2004) *PHOSPHORUS LETTER*, No.50, pp.9-17
- [4] 黒田章夫、滝口昇、加藤純一、大竹久夫 (2005) 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、*Journal of Environmental Biotechnology* (環境バイオテクノロジー学会誌), Vol.4 (2), pp.87-94
- [5] 資源のみち委員会 (2007) 資源のみちの実現に向けて報告書 (素案)、<http://www.mlit.go.jp/crd/city/sewage/gyosei/sigen6th/03.pdf>
- [6] 浜田康治、久場隆広、岡崎光夫、Vladimir TORRICO、楠田哲也 (2005) UCT 法を用いた栄養塩除去法の冬季における問題点、土木学会論文集、No.783、VII-34、pp.61-69
- [7] HAMADA Kouji, Takahiro KUBA, Vladimir TOORICO, Mitsuo OKAZAKI, Tetsuya KUSUDA (2006) *Water Science & Technology*, Vol.53 (9), pp.169-175
- [8] TORRICO Vladimir, Takahiro KUBA, Tetsuya. KUSUDA (2006) Effect of Particulate Biodegradable COD in a Post-denitrification Enhanced Biological Phosphorus Removal System, *Journal of Environmental Science and Health, Part A Toxic/Hazardous Substance & Environmental Engineering*, Vol.A41 (8), pp.1715-1728
- [9] TORRICO Vladimir, Takahiro KUBA (2006) Effect of Anaerobic SRT on Complete Phosphate Removal in a Post-denitrification System, 環境工学研究論文集, Vol.43、pp.327-332
- [10] LU Huabing *et al.* (2006) Obtaining Highly Enriched Cultures of *Candidatus Accumulibacter phosphates* through Alternating Carbon Sources, *Water Research*, Vol.40, No.20, pp.3838-3848
- [11] DAI Yu *et al.* (2007) Anaerobic Metabolism of *Defluviicoccus vanus* Related Glycogen Accumulating Organisms (GAOs) with Acetate and Propionate as Carbon Sources, *Water Research*, Vol.41, No.20, pp.1885-1896
- [12] 津野 洋、Wilasinee SAKTAYWIN、永禮 英明、早川 恒成 (2007) 汚泥削減・リン回収型生物学的な高度処理プロセスの開発、下水道協会誌、Vol.44、No.531、pp.151-160