実下水処理場の生物学的リン除去プロセスにおける 脱窒性脱リン細菌の評価

庄 司 仁* 佐 藤 弘 泰** 味 埜 俊**

Estimation of Denitrifying Polyphosphate-Accumulating Organisms in Enhanced Biological Phosphorus Removal Process Treating Municipal Wastewater

Tadashi SHOJI*, Hiroyasu SATOH** and Takashi MINO**

* Department of Urban Engineering, University of Tokyo, Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo 226-0026, Japan

** Institute of Environmental Studies, University of Tokyo, Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo 226-0026, Japan

Abstract

Denitrifying polyphosphate-accumulating organisms (DN-PAOs) in the biological phosphorus removal process treating municipal wastewater were studied. On the basis of the ratio of anoxic phosphate uptake rate (PUR) to aerobic PUR, it was suggested that the minimized aeration for mixing the anaerobic tank is fatal to DN-PAOs even if the dissolved oxygen concentration was nearly equal to zero. The results also suggested that DN-PAOs preferred the anoxic followed by anaerobic conditions although they could be significantly observed in the processes without anoxic conditions. Moreover, the ratio serves as one of the parameters of the activated sludge model No.2d (ASM2d). From the sensitive analysis of the parameter in an A2O process, we could conclude that the phosphorus removal ability depended on the ratio of DN-PAOs. On the other hand, it did not affect the nitrogen removal ability (both nitrification and denitrification) very much. The parameter observed in the present experiments showed that we had to calibrate or measure it in each plant for the valid simulation of simultaneous nitrogen and phosphorus removal systems based on the ASM2d.

Key words: activated sludge model, biological nutrient removal, denitrifying polyphosphate-accumulating organisms (DN-PAOs), enhanced biological phosphorus removal (EBPR)

1. は じ め に

閉鎖性水域の水質を良好に保つためには、窒素やリンといった栄養塩類の外部からの負荷を減らす必要がある。そのため、主要な発生源の一つである都市下水について、窒素・リンを処理の対象物質として考慮する必要がある。現在の下水処理施設では、有機物 (BOD) 除去を目的とする既存の活性汚泥法と組み合わせることが可能で、物理化学的な処理よりも低コストになるという理由から、生物学的な手法を採用する動きが広がっている。

生物学的な窒素除去は、硝化細菌によるアンモニア性窒素から硝酸性窒素への酸化 (硝化)、および脱窒細菌による硝酸性窒素から窒素ガスへの還元 (脱窒) によって構成されている。一方、生物学的なリン除去は、細胞内にポリリン酸を蓄積する微生物 (ポリリン酸蓄積細菌, PAOs) のはたらきによるものである。PAOsは嫌気状態 (電子受容体の存在しない状態) において、細胞内のポリリン酸を加水分解してエネルギーを得ることができる。このエネルギーを利用することで、一般的な従属栄養細菌には不可能である、嫌気的な有機物の摂取・蓄積という代謝を行う。さらに好気状態では、蓄積した有機物を酸化分解するエネルギーでリン酸を摂取して、嫌気状態で消費した以上のポリリン酸を再び蓄積する。一連の代謝により、バルク中の

リン酸が汚泥中に濃縮されることになるので、汚泥の引抜により下水からのリン除去が実現できる。これら3種類の微生物を組み合わせれば窒素・リンの同時除去が可能で、嫌気無酸素好気 (A2O) 法などの実用例もある。

しかしながら、脱窒細菌とPAOsがともに従属栄養細菌であるために、窒素除去とリン除去は、炭素源となる有機物に対して競合関係となっている。したがって、窒素やリンの量に対して有機物が少ない日本の下水水質を考えると、有機物の量が制限因子となって、窒素・リン同時除去がうまく機能しないという問題を抱えている。

このような問題を解決する手段として注目されているのが、硝酸を電子受容体として利用できるPAOs (脱窒性脱リン細菌, DN-PAOs) の活用である。そもそも無酸素状態 (酸素は存在しないが、硝酸・亜硝酸は存在する状態) でのリン摂取という現象は、1980年代後半から報告されていた^{1,2,3)}。その後、電子受容体として酸素しか使えない好気的なPAOsと、酸素と硝酸の両方を使えるDN-PAOsが存在するという実験結果が報告され⁴⁾、現在では広く受け入れられている。DN-PAOsの特徴は、嫌気状態で摂取・蓄積した有機物を、リン除去だけでなく脱窒にも重複して使えることである。したがって、DN-PAOsを活用できれば、脱窒とリン除去との有機物の競合関係が緩和すると期待される。その結果として、窒素・リンの除去能力が向上した

* 東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻 〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

** 東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学専攻 〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

という実験室レベルでの実証例もある⁵⁾。

実際の下水処理場におけるDN-PAOsについては、ヨーロッパでの研究事例が存在する^{6, 7)}。生物学的な窒素・リン除去プロセスについて、無酸素条件でのリン摂取速度が好気条件の20～50%であったこと⁶⁾、あるいは、プロセス全体のリン除去能の約30%をDN-PAOsが担っていたこと⁷⁾、などが報告されている。しかしながら、これらの研究対象はUCT法という特殊な処理方式であり、嫌気好気法やA2O法が主流となっている日本の処理場にあてはめるには適当でない。そこで本論文では、各種の生物学的リン除去法（嫌気好気法、擬似嫌気好気法、A2O法、外部硝化－嫌気無酸素法⁸⁾）を採用して、なおかつ実際の都市下水を処理している施設の汚泥を対象に、DN-PAOsの存在量を評価することとした。

なおDN-PAOsという言葉は、単離・同定された特定の細菌を指すものではないので、その存在量を定量的に測ることはできない。存在量を反映した指標として、本論文では、無酸素状態でのリン摂取速度と好気状態でのリン摂取速度の比（以下、リン摂取活性比と呼ぶ）を採用する。これは、すべてのPAOs（好気的なPAOsとDN-PAOsの合計）に占めるDN-PAOsの比率をよく反映しているという研究事例^{9, 10)}が存在するためである。

さらに、ここで定義したリン摂取活性比は、国際水協会（IWA）の提唱する活性汚泥モデル（ASM）¹¹⁾におけるパラメータの一つである、無酸素状態におけるPAOsの活性低下係数 η_{NO_3} に対応している。近年、下水処理施設の効率的な運転管理などにASMを活用する機運が高まってきており¹²⁾、そのパラメータに関する知見を集めていくことの意義は大きい。このような背景を踏まえて、本論文の後半では、ASMにおける η_{NO_3} の感度解析を行い、測定された値およびその変動の意義を考察した。

2. 方 法

2.1 調査対象の処理施設

東京近郊にある12ヶ所の下水処理場から、規模や処理方式の異なる17種類の処理系列を選び、汚泥を採取した（詳細はTable 1参照）。試料の採取時には、生物学的なリン除去を意図していないもの（MBR-1と-12）を除いて、処理施設のリン除去能が良好であることを口頭で確認した。

2.2 リン摂取活性試験

以下に述べる方法によって、無酸素状態および好気状態でのリン摂取速度をそれぞれ測定した。また、無酸素状態での摂取速度と好気状態での摂取速度の比を、「リン摂取活性比」と定義して、計算した。

1) リン酸を蓄積した汚泥混合液（MLSSとして1～1.5gを含む）を沈殿させて、100～200mL程度に濃縮する。

2) 密閉できる三角フラスコに移して、希釈液（30.2mg・L⁻¹塩化カルシウム六水和物、14.0mg・L⁻¹塩化カリウム、4.4mg・L⁻¹塩化マグネシウム二水和物）で1Lに希釈する。これを2系列用意する。

3) 窒素ガスで溶存酸素をパージする（約10分間）。

4) 酢酸ナトリウム水溶液を、約6mgC・L⁻¹となるように添加する。

5) マグネティックスターラーで攪拌を行いながら、嫌気状態で汚泥に有機物（酢酸）を摂取させる。

6) 60分後、1系列は空気曝気を開始することで、好気状態に変更する。もう1系列には硝酸カリウム水溶液を約15mgN・L⁻¹となるように添加して、無酸素状態を設定する。

7) 好気もしくは無酸素状態を60分間保持して、リン酸濃度の変化から、リン摂取速度を計算する。

なお、実験中は希硫酸を添加してpH<7.2となるように制御した結果、6.8～7.2の範囲に維持された。また、好気および無酸素状態では、5～10分ごとに汚泥混合液を採取して、直ちにガラス繊維ろ紙（Watman社GF/F、孔径0.7μm）でろ過した後、必要な水質項目を測定した。

2.3 分析方法

リン酸・硝酸およびMLSS・MLVSSは、下水試験方法¹³⁾を参照して、それぞれモリブデン酸青（アスコルビン酸還元）吸光光度法、ブルシン法、遠心分離法に準じて行った。

2.4 活性汚泥モデルによるシミュレーション

活性汚泥モデル（ASM）は、無酸素状態におけるリン摂取の概念を含んでいるASM No.2d（以下、ASM2d）を使用した。ASM2dでは、すべてのPAOsが無酸素状態でリン酸を摂取するが、速度は好気状態の η_{NO_3} 倍になる（低下する）と設定されている。このパラメータについては、無酸素状態での一般的な活性の低下から類推して、0.6という値がデフォルト値として提唱されている。本論文で測定するリン摂取活性比は、この η_{NO_3} と対応しており、したがって、処理施設における η_{NO_3} を実験的に求めていることに相当する。そこで、測定したリン摂取活性比を参考にしながら、デフォルト値の妥当性の評価を含めて、パラメータの感度解析を行うこととした。

Table 1 Summary of the sludge samples.

Name*1	Process	Scale
A2N-1	A2N*2	Laboratory
A2O-1	A2O	Pilot
A2O-2	A2O	Full-scale Plant
A2O-3	A2O	Full-scale Plant
A2O-4	A2O	Full-scale Plant
A2O-5	A2O	Full-scale Plant
AO-1	AO*3-SBR*4	Laboratory
AO-2	AO	Full-scale Plant
AO-6	AO	Full-scale Plant
AO-7	AO	Full-scale Plant
AO-8	AO	Full-scale Plant
PAO-1	pseudo-AO*5	Full-scale Plant
PAO-9	pseudo-AO	Full-scale Plant
PAO-10	pseudo-AO	Full-scale Plant
PAO-11	pseudo-AO	Full-scale Plant
MBR-1	MBR*6	Laboratory
MBR-12	DN-MBR*7	Pilot

*1: The same number indicates the same influent.

*2: Anaerobic-anoxic and external nitrification.

*3: Anaerobic-aerobic with mixing machine in the anaerobic tank.

*4: Sequencing batch reactor.

*5: Anaerobic-aerobic with minimized aeration for mixing the anaerobic tank.

*6: Membran bioreactor (aerobic only).

*7: Membran bioreactor (anoxic-aerobic).

Table 2 Operational conditions and influent for the simulation.

Operational Conditions	
Anaerobic HRT	2 h
Anoxic HRT	4 h
Aerobic HRT	6 h
SRT	12 d
Return sludge ratio	20 %
Circulation ratio	100 %
DO in aerobic tank	3 mg·l ⁻¹
Influent	
total-CODCr	260 mg·l ⁻¹
dissolved-CODCr	130 mg·l ⁻¹
NH ₄ -N	16/20/24 mg·l ⁻¹
PO ₄ -P	3.6 mg·l ⁻¹

具体的には、仮想的なA2O法の処理施設を想定して、一定の流入水質・水量を与えた場合の、定常状態における処理水質と微生物量（PAOsおよびその他の従属栄養細菌）に対する η_{NO_3} の感度解析を行った。主な設計因子と与えた流入水質はTable 2に示したとおりである。DN-PAOsのはたらきと密接に関わる嫌気状態と好気状態の滞留時間、およびSRTは、実際のA2O法（試料を採取した処理施設）の平均的な数値を用いた。その他の運転条件はDN-PAOsのはたらきと直接的な関係がないので、A2O法における一般的な値を適宜あてはめた。流入水質の水質や詳細な分画は、ASM2dに示されているものを採用したが¹¹⁾、DN-PAOsに与える影響が無視できないと予想されるC/N比について、アンモニア性窒素を増やしたシナリオで確認した。なお本論文におけるシミュレーションには、計算用ソフトウェアとしてAQUASIM¹⁴⁾を用いた。

3. リン摂取活性試験の結果と考察

3.1 好気状態と無酸素状態におけるリン摂取速度

まず、活性試験で測定した好気状態・無酸素状態におけるリン摂取速度、およびリン摂取活性比をTable 3に示した。好気状態では、膜分離標準法であるMBR-1を除いて、リンの摂取が観察された。単位汚泥量あたりのリン摂取速度は0.5～17.5mgP·gMLVSS⁻¹·h⁻¹と広範囲になった。一方の無酸素状態では、活性の存在が予想された外部硝化-嫌気無酸素法やA2O法に加えて、無酸素工程を持たない嫌気好気法の汚泥でも、一定の活性が見られた。逆に、擬似嫌気好気法や膜分離硝化脱窒法の汚泥では、無酸素状態においてリンの放出（負の摂取速度）が見られるなど、DN-PAOsの活性は観察されなかった。

3.2 リン摂取活性比とその影響因子

3.2.1 処理方式の影響

Table 4は、DN-PAOsと処理方式との関係を明らかにするために、生物学的リン除去の方式ごとにリン摂取活性比の平均値をまとめたものである。また、同一の処理場における複数の処理方式の測定結果も併せて記した。

リン摂取活性比の値は、外部硝化-嫌気無酸素法で最も高い0.54（24回の測定結果の平均値）となり、個別の測定でも0.4～0.7と安定して高い値を示した。次いで、A2O法（5ヶ所の平均値で0.32）嫌気好気法（同じく0.16）の順

Table 3 Phosphate uptake rate (PUR) and ratio of anoxic PUR to aerobic PUR.

Name	Aerobic PUR [mgP·gMLVSS ⁻¹ ·h ⁻¹]	Anoxic PUR	Ratio
A2N-1 ^{*1}	17.5	9.5	0.54
A2O-1	8.4	1.6	0.19
A2O-2	10.0	3.6	0.36
A2O-3	5.1	1.2	0.24
A2O-4	3.7	2.2	0.59
A2O-5	6.6	1.3	0.20
AO-1	8.0	1.4	0.18
AO-2	10.7	2.6	0.24
AO-6	6.6	1.5	0.23
AO-7	7.7	0	0
AO-8	8.0	1.0	0.13
PAO-1	10.0	-0.7	-0.07
PAO-9	0.9	0	0
PAO-10	0.5	0	0
PAO-11	6.5	-1.9	-0.29
MBR-1	0	0	0
MBR-12	2.4	-1.9	-0.79

*1: Average of 24 experiments. See Shoji *et al.* (2003) in detail.

Table 4 Ratio of anoxic PUR to aerobic PUR (average, Plant-1 and Plant-2).

Process	Average	Plant-1	Plant-2
A2N	0.54	0.54	no data
A2O	0.32	0.19	0.36
AO	0.16	0.18	0.24
PAO	-0.09	-0.07	no data

に低くなったが、この二つの処理方式を比べる際には、活性比のばらつきが大きいのにに対してデータの数が少ないことに注意が必要である。一方、擬似嫌気好気法や嫌気状態のない処理方式では活性比がゼロ以下となり、明確な違いが現れた。

DN-PAOsの活性に関して注目すべきことは、嫌気好気法と擬似嫌気好気法との相違である。これらの処理方式は、嫌気状態における攪拌方法（機械攪拌＝嫌気好気法、低風量の曝気＝擬似嫌気好気法）を除いて、ほとんど同じである。また、後者の場合でも、反応槽内の溶存酸素はほぼゼロに等しい。ゆえに、嫌気状態における酸素供給は、溶存酸素として検出されなくても、DN-PAOsの活性が現れるかどうかを左右する重要な因子であることが示唆された。

次に、嫌気好気法とA2O法を比べると、無酸素状態の有無は、DN-PAOsの出現やその集積度合いを左右する条件とはなっていないようである。実験室レベルでの既存の研究事例では、硝化を抑制した嫌気好気法でも、リン摂取活性比が0.15程度を示したという報告⁹⁾がある。つまり、日常的に硝酸を電子受容体としたリン摂取を行っていないとしても、潜在的に脱窒能力を持つPAOsは少なからず存在する。さらに、調査対象とした施設の多くは、硝化を促進する運転を行っていたため、硝酸に触れている時間帯もあるはずである。したがって、活性比が0.15に近い嫌気好気法や一部のA2O法では、DN-PAOsを積極的に集積しているという

よりも、潜在的に脱窒能力を持つPAOsが存在していたものと考えられる。逆にA2O-2や-4では、DN-PAOsがある程度まで集積されていると考えられるが、その原因となるような他のA2O法との相違点は見出せなかった。

さらに、外部硝化—嫌気無酸素法とA2O法におけるリン摂取活性比の違いについても、考察が必要である。どちらも無酸素状態でのリン摂取が起こり得る構成になっているが、前者では汚泥が好気状態に曝されない。このことは、二つの形でDN-PAOsの活性に影響すると予想される。

第一に、脱窒がより盛んになって、処理水中の硝酸濃度が低下する。そのため、返送汚泥に含まれる硝酸濃度が低くなり、それを受け入れる嫌気槽に対する硝酸の負荷も小さくなる。PAOsにとっては、嫌気的な条件における有機物摂取が非常に重要であり、それを妨げる硝酸の存在量はリン除去能に大きく影響する。つまり、DN-PAOsのはたらかで脱窒が進行すればするほど、DN-PAOsに限らずPAOs全体の有機物摂取に有利な状況になってゆく。このことは、DN-PAOsの利点の一つとして報告されており³⁾、本論文においても、外部硝化—嫌気無酸素法が好気状態と無酸素状態の両方で最も高いリン摂取速度を示したことが、つまり、単位汚泥量あたりで見たPAOsの活性が高くなったことに反映されている。

第二に、好気的なPAOsとDN-PAOsとの競合という観点から見て、好気状態が存在しないことが、DN-PAOsにとって非常に有利にはたらく。これは、DN-PAOsにとって好気状態が有害であることを意味するのではない¹⁵⁾。しかしながら、Filipeらは、回分式A2O法のリアクターをシミュレーションしたところ、好気状態が1時間以上（ただし1サイクル6時間、無酸素状態と好気状態の合計が3.5時間）になると、DN-PAOsは好気的なPAOsとの競争に敗れてウォッシュアウトしてしまう、と述べている¹⁶⁾。逆に、好気状態が0.5時間ならば、好気的なPAOsの方がウォッシュアウトする結果になっている¹⁶⁾。本論文では、好気状態をなくすることがDN-PAOsを高度に集積するのに有効であることを、実験的に確認できたと言える。

3.2.2 流入水質と汚泥滞留時間の影響

調査対象の嫌気好気法とA2O法のうち8ヶ所の処理施設については、直近の月もしくは年度の平均値として、流入水質および汚泥滞留時間（SRT）に関するデータを得た。そこで、これらの指標のDN-PAOsへの影響を見るために、好気および無酸素状態でのリン摂取速度、リン摂取活性比との相関を求めて、Table 5に整理した。

先に述べたとおり、有機物に対する競合関係という観点から見て、窒素やリンに対して有機物の量が多ければ、生物学的なリン除去はうまくいくと考えられる。今回の結果でも、好気および無酸素状態でのリン摂取速度（すなわち汚泥のリン除去活性）と、C/P比およびC/N比は正の相関となっている。それと同時に、このような指標はリン摂取活性比（すなわちDN-PAOsの集積度合い）にはまったく影響していないことになる。

その一方、SRTを見てみると、好気状態と無酸素状態のリン摂取速度で正負が逆になっているため、リン摂取活性比と正の相関（相関係数=0.61）になった。因果関係を推定するにはデータの数が少ないものの、DN-PAOsを集積するためには長いSRTの方が適している、という可能性を示唆する研究事例は他にも存在する。例えばHuらは、実下

Table 5 Correlation coefficient between PUR and influent or SRT.

	Aerobic PUR	Anoxic PUR	PUR ratio
COD Mn	0.30	0.02	-0.12
PO ₄ -P	-0.29	-0.49	-0.23
NH ₄ -N	-0.76	-0.25	0.26
CODMn/PO ₄	0.60	0.58	0.14
CODMn/NH ₄	0.79	0.26	-0.24
SRT	-0.53	0.34	0.61

水を処理するプロセスでDN-PAOsを活用するためには、無酸素状態で十分な量の硝酸を供給する必要があるとしている¹⁷⁾。そのためには、独立栄養で収率の低い硝化細菌を高度に集積しなければならず、結果として長いSRTが必要となる。また、DN-PAOs自体も、好気的なPAOsに比べて収率が低いとしている¹⁷⁾。このことも、長いSRTが適している理由となり得る。

4. シミュレーション結果と考察

4.1 処理水質に対する η_{NO_3} の影響

シミュレーション結果のうち、処理水質（硝酸とリン）に関するものをFig. 1に示した。なお、アンモニア性窒素や有機物（COD Cr）については、すべてのシミュレーションを通して一定の結果（不活性な有機物成分を除いてほとんど除去される）であったので、省略した。

まず硝酸については、窒素負荷にかかわらず、 η_{NO_3} の影響が小さい。つまり、DN-PAOsの活性が、プロセス全体の脱窒能力を左右するものではないと考えられる。

次にリンについては、特に窒素負荷が大きいシナリオにおいて η_{NO_3} に強く影響されている。例えばアンモニアとして24mgN・ l^{-1} が流入するシナリオでは、DN-PAOsを無視する（ $\eta_{\text{NO}_3}=0$ ）と0.84mgP・ l^{-1} 、今回測定したA2O

Fig. 1 Result of the simulation; NO₃-N and PO₄-P in the effluent.

法での最低 ($\eta_{\text{NO}_3}=0.2$) だと $0.61\text{mgP} \cdot \text{l}^{-1}$, 最高の値かつASM2dのデフォルト値 ($\eta_{\text{NO}_3}=0.6$) だと $0.37\text{mgP} \cdot \text{l}^{-1}$ という処理水質が計算された。つまり, 生物学的リン除去能力に対しては, DN-PAOsの貢献が無視できない大きさを持つため, その活性が処理水質を左右すると考えられる。

以上の結果から, 少なくともA2O法のような窒素・リン同時除去プロセスのシミュレーションを行う際には, DN-PAOsを考慮しているASM2dが適切であると言える。しかしながら, 実際のA2O法の処理場における活性低下係数 η_{NO_3} は, 0.6というデフォルト値よりも低くなることが多い。したがって, リンの正確なシミュレーション結果を得るためには, デフォルト値をそのまま使うのではなく, 活性試験などから η_{NO_3} を求めておく必要がある。

4.2 微生物量に対する η_{NO_3} の影響

Fig. 2には, 微生物量(従属栄養細菌およびPAOs)の計算結果を示した。硝化細菌の結果は, η_{NO_3} の影響による変動がほとんどないことから省略した。

今回のシナリオでは, 窒素負荷が大きくなるほどPAOsの比率が低下する結果になった。これは, 嫌気槽への硝酸の負荷が大きくなり, 結果としてPAOsの嫌気的な有機物摂取が妨害されるためと考えられる。 η_{NO_3} の影響に関しては, アンモニア $24\text{mgN} \cdot \text{l}^{-1}$ が流入シナリオのPAOsの計算結果を示すと, $\eta_{\text{NO}_3}=0$ だと $323\text{mgCOD} \cdot \text{l}^{-1}$, $\eta_{\text{NO}_3}=0.2$ だと $354\text{mgCOD} \cdot \text{l}^{-1}$, $\eta_{\text{NO}_3}=0.6$ だと $407\text{mgCOD} \cdot \text{l}^{-1}$ となり, それぞれ, PAOsと他の従属栄養細菌との合計に対して28%, 30%, 34%という割合になった。このような変動の原因は, η_{NO_3} の表しているものが, 無酸素状態でのリン摂取速度だけでなく増殖速度の減衰も含んでいるためである。ただし, リン摂取速度と増殖速度では, 減衰の度合いが異なるという指摘もあるので^{16,18)}, リン摂取活性比を生物量の議論にそのまま用いることには注意が必要である。

5. ま と め

実下水を処理する生物学的リン除去プロセスの汚泥について, 硝酸を利用してリンを摂取できる脱リン細菌である, 脱窒性脱リン細菌(DN-PAOs)の活性を調査した。無酸素状態と好気状態におけるリン摂取速度を測定して, その比(リン摂取活性比)をDN-PAOsの指標とみなして検討を行ったところ, 次のような結論が得られた。

1) リン摂取活性比は, 外部硝化-嫌気無酸素法が最も高く(平均で0.54), 擬似嫌気好気法および嫌気状態のない膜分離法ではゼロ以下の値になった。A2O法(平均で0.32)と嫌気好気法(同じく0.16)は, 外部硝化-嫌気無酸素法に及ばなかった。

2) DN-PAOsの出現を左右する要因として, 嫌気状態への酸素の混入の有無が示唆された。すなわち, たとえ溶存酸素濃度がゼロであったとしても, 曝気が行われているならばDN-PAOsは出現しない。

3) 好気状態がないとリン摂取活性比は高まり, そのようなプロセスの一つである外部硝化-嫌気無酸素法では0.54となった。

4) 検討した範囲では, 流入水質とリン摂取活性比との間に相関は見られなかった。

5) 汚泥滞留時間に関しては, 長いほどリン摂取活性比が高くなる可能性がある。

また, 活性汚泥モデル(ASM)において, リン摂取活性比と対応している η_{NO_3} の感度解析を行った。仮想的なA2O法の処理施設に対して, 窒素負荷を変えたシミュレーションを行ったところ, 以下のような結果が得られた。

1) 処理水中の硝酸およびアンモニア性窒素については, η_{NO_3} の影響がほとんど見られず, 一定の脱窒および硝化能力が発揮されていた。

2) リン酸濃度については, 測定した試料の属していた範囲(0.2~0.6)で, η_{NO_3} が小さいほど高濃度で残っているという影響が見られた。特に窒素負荷が高い場合にその傾向が顕著であり, η_{NO_3} が0.6の時の処理水リン酸濃度は, 0.2のときの60%程度であった。

3) 微生物量に関しては, η_{NO_3} が小さいほどPAOsの絶対量, および従属栄養微生物に占める割合が低下する結果になった。具体的には, η_{NO_3} が0.2の場合のPAOsの量は, 0.6の場合の90%弱になった。

謝 辞

汚泥を提供して頂いた, 川崎市建設局下水道建設部, 東京都下水道局, 日本下水道事業団, 東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻の関係者各位に深く感謝いたします。

本研究を行うにあたって, 文部省科学研究費補助金COE形成基礎研究(OFCE2002)の助成を受けたことを記するとともに, 謝意を表します。

(原稿受付 2003年10月20日)

(原稿受理 2004年 1月15日)

参 考 文 献

- 1) Gerber, A., de Villiers, H., Mostert, E.S. and van Riet, C.J.J. (1987) The phenomenon of simultaneous phosphate uptake and release, and its importance in biological nutrient removal. In: *Advances in Water Pollution Control*, R. Ramadori (ed.), Pergamon Press, Oxford, 123-134.
- 2) Comeau, Y., Oldham, W.K. and Hall, K.J. (1987) Dynamics of carbon reserves in biological dephosphatation of wastewater. In: *Advances in Water Pollution Control*, R. Ramadori (ed.), Pergamon Press, Oxford, 39-55.
- 3) Vlekke, G.J.F.M., Comeau, Y. and Oldham, W.K. (1988) Biological phosphate removal from waste-water with oxygen or nitrate in sequencing batch reactors. *Environmental Technology Letters*, 9(8), 791-796
- 4) Kern-Jespersen, J.P. and Henze, M. (1993) Biological phosphorus uptake under anoxic and aerobic conditions. *Water Research*, 27(4),

Fig. 2 Result of the simulation; PAOs and other Heterotrophs in the aerobic tank.

- 617-624.
- 5) Kuba, T., van Loosdrecht, M.C.M. and Heijnen J.J. (1996) Phosphorus and nitrogen removal with minimal COD requirement by integration of denitrifying dephosphatation and nitrification in a two-sludge system. *Water Research*, **30**(7), 1702-1710.
 - 6) Kuba, T., van Loosdrecht, M.C.M., Brandse, F.A. and Heijnen, J.J. (1997) Occurrence of denitrifying phosphorus removing bacteria in modified UCT-type wastewater treatment plants. *Water Research*, **31**(4), 776-786.
 - 7) Ostgaard, K., Christensson, M., Lie, M., Jonsson, K. and Welanders, T. (1997) Anoxic biological phosphorus removal in a full-scale UCT process. *Water Research*, **31**(11), 2719-2726.
 - 8) Shoji, T., Satoh, H. and Mino, T. (2003) Quantitative estimation of the role of denitrifying polyphosphate accumulating organisms in nutrient removal. *Water Science and Technology*, **47**(11), 23-29.
 - 9) Wachtmeister, A., Kuba, T., van Loosdrecht, M.C.M. and Heijnen, J.J. (1997) A sludge characterization for aerobic and denitrifying phosphorus removing sludge. *Water Research*, **31**(3), 471-478.
 - 10) Meinhold, J., Filipe, C.D.M., Daigger, G.T. and Isaacs, S. (1999) Characterization of the denitrifying fraction of phosphate accumulating organisms in biological phosphate removal process. *Water Science and Technology*, **39**(1), 31-42.
 - 11) Henze, M., Gujer, W., Mino, T. and van Loosdrecht, M.C.M. (2000) Activated Sludge Model No. 3. Scientific and Technical Report No 9: Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. IWA Task Group on Mathematical Modeling for Design and Operation of Biological Wastewater Treatment, IWA Publishing, London.
 - 12) 活性汚泥モデル研究会編 (2002) 活性汚泥モデルの実務利用に関する検討報告書.
 - 13) 日本下水道協会 (1997) 下水試験方法, 日本下水道協会, 東京.
 - 14) Reichert, P. (1994) AQUASIM - a tool for simulation and data analysis of aquatic systems. *Water Science and Technology*, **30**(2), 21-30.
 - 15) Kuba, T., van Loosdrecht, M.C.M. and Heijnen, J.J. (1996) Effect of cyclic oxygen exposure on the activity of denitrifying phosphorus removing bacteria. *Water Science and Technology*, **34**(1-2), 33-40.
 - 16) Filipe, C.D.M. and Daigger, G.T. (1999) Evaluation of the capacity of phosphorus-accumulating organisms to use nitrate and oxygen as final electron acceptors: a theoretical study on population dynamics. *Water Environment Research*, **71**(6), 1140-1150.
 - 17) Hu, Z.R., Wentzel, M.C. and Ekama, G.A. (2002) Anoxic growth of phosphate-accumulating organisms (PAOs) in biological nutrient removal activated sludge systems. *Water Research*, **36**(19), 4927-2937.
 - 18) Kuba, T., Murnleitner, E., van Loosdrecht, M.C.M. and Heijnen, J.J. (1996) A metabolic model for biological phosphorus removal by denitrifying organisms. *Biotechnology and Bioengineering*, **52**, 685-695.