

垂水処理場におけるりん蓄積細菌の挙動調査

建設局下水道部計画課

1. 調査概要

下水処理場において、りんの除去を担うのはりん蓄積菌(以下 PAOs)とされている。PAOs は嫌気下で菌内のポリりん酸を加水分解してりんの放出を行い、同時に有機物を取り込む。そして好気下ではりんを取り込み、再度ポリりん酸として蓄積する。実施設では嫌気槽においてりんの吐き出しが起こり、槽内のりん濃度が上昇する。続く好気槽では、嫌気下での吐出量以上にりんを過剰に摂取する。このりんの過剰摂取により、下水中のりん除去が可能となっている。

近年、PAOs の一種で、無酸素条件下で硝酸や亜硝酸を利用し、りんを摂取する脱窒性 PAOs (以下 DN-PAOs) が報告されている¹⁾。この DN-PAOs は脱窒とりん除去を同時に担えるため、活用できれば、曝気量の低減や余剰汚泥発生量の削減が期待できるとされている²⁾。本市において DN-PAOs に関する調査例がないことから、本調査では実施設での活性汚泥を用いてりん除去試験を行い、DN-PAOs の挙動を調べた。

実施設は垂水処理場本場 1 系、2 系を選定した。当該系列では 5 月～9 月の夏季に硝化促進運転を行い、10 月～4 月の冬季は放流水中に栄養塩を確保する栄養塩管理運転を実施している。夏季と冬季で運転状況が全く異なるため、各運転で特徴的なデータが得られることを期待した。本報告では夏季、冬季で実施したりん除去試験の結果を示すとともに、活性汚泥中の PAOs、特に DN-PAOs について考察する。

2. 試験方法

試験は嫌気状態 90 分間、好気状態及び硝酸 180 分間の回分式試験を実施した。概略図を図-1 に示す。

まず試験当日に採取した垂水処理場本場 1 系、2 系の最初沈殿池流出水を等量混合し、混合初沈流出水を作製した。この混合初沈流出水に pH 緩衝材として炭酸水素ナトリウムを 240 mg/L になるように加えた。また、アンモニア酸化菌(AOB)を抑制するため、アリルチオ尿素(ATU)を 500 mg/L になるように添加した。これは好気状態で AOB による硝化が PAOs の酸素消費と競合し、PAOs のりん摂取が阻害されることを懸念したためである。

混合初沈流出水を 2 つのポリバケツに取り、それぞれ本場 1 系、2 系の返送汚泥を混合し、試験を開始した。試験に用いた混合初沈流出水及び返送汚泥の量は表-1 のとおりである。これらの量は実施設の返送率と同条件として設定した。

試験開始から試料を攪拌して嫌気状態を保った。混合から $t=0, 15, 30, 60, 90$ 分に採取し、孔径 $1\mu\text{m}$ のガラス繊維ろ紙でろ過した。90 分間の攪拌後、混合試料をそれぞれ 2 つに分割した。分割後、それぞれに 1) 硝酸ナトリウム 20 mg/L 添加(条件①、③) 2) 曝気

(条件②、④)を行った。その後、 $t=105, 120, 150, 210, 270$ 分に採取し、孔径 $1\mu\text{m}$ のガラス繊維ろ紙でろ過した。

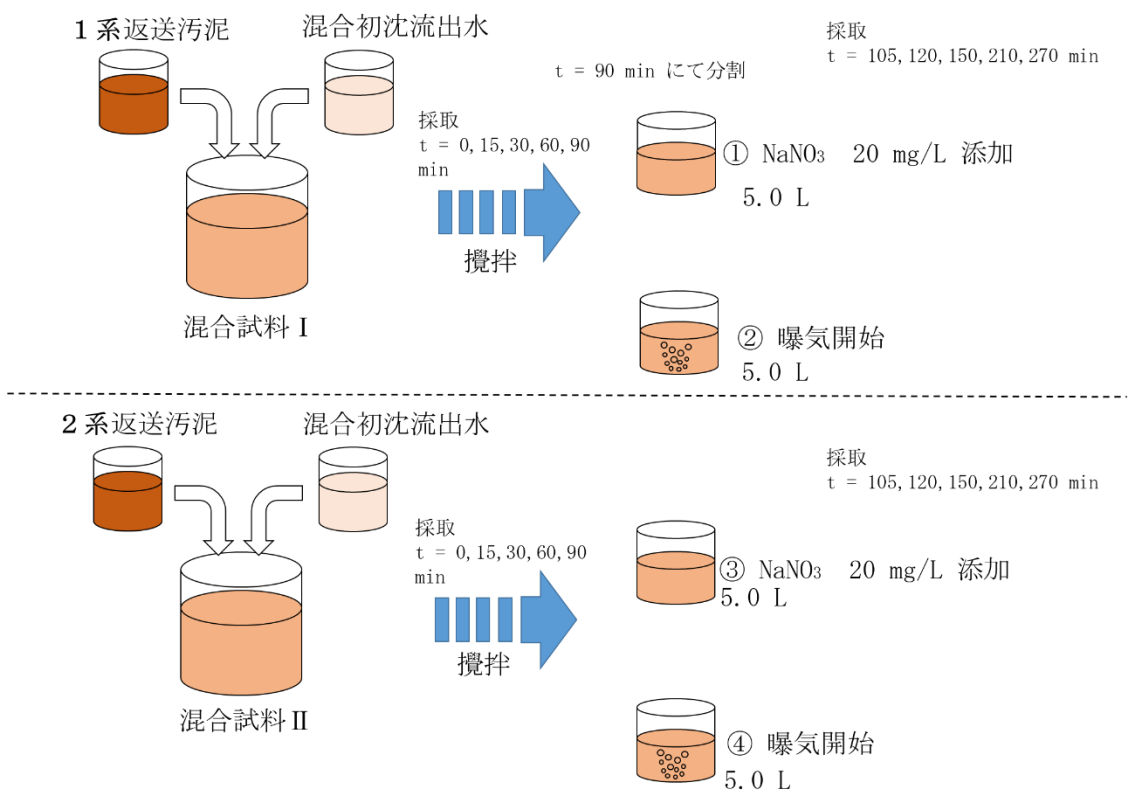


図-1 回分式試験の概略図

夏季			冬季		
実施設 返送率	本試験 返送汚泥量	本試験 初沈流出水量	実施設 返送率	本試験 返送汚泥量	本試験 初沈流出水量
80~90%	14L	16L	60~70%	9L	15L

表-1 試験に用いた返送汚泥、初沈流出水量

3. 結果

本場 1 系、2 系のりん酸態りんの経時変化を図-2 に示す。いずれの結果でも、試験開始後の嫌気状態でりん酸態りん濃度の上昇が見られた。その後、硝酸添加及び曝気開始とともにりん酸態りん濃度の低下がみられた。本場 2 系の冬の曝気条件（2 系青④）では、嫌気状態でのりん吐出量のよりも、好気状態でのりん摂取量が多く、りんの過剰摂取が観察された。

これに対して、本場 1 系の夏季、冬季及び 2 系の夏季では、嫌気状態でのりんの吐出量よりも、好気状態でのりんの摂取量が少なく、終了時のりん濃度が当初より高くなる結果となった。特に、嫌気/好気状態とした 1 系②、2 系黄④では、実処理場の処理を模した A0 法によるりん除去試験であるにも関わらず、りんの過剰摂取が観察されなかった。

実施設同様の過剰摂取が観察できたのは本場 2 系の冬の曝気条件のみであった。

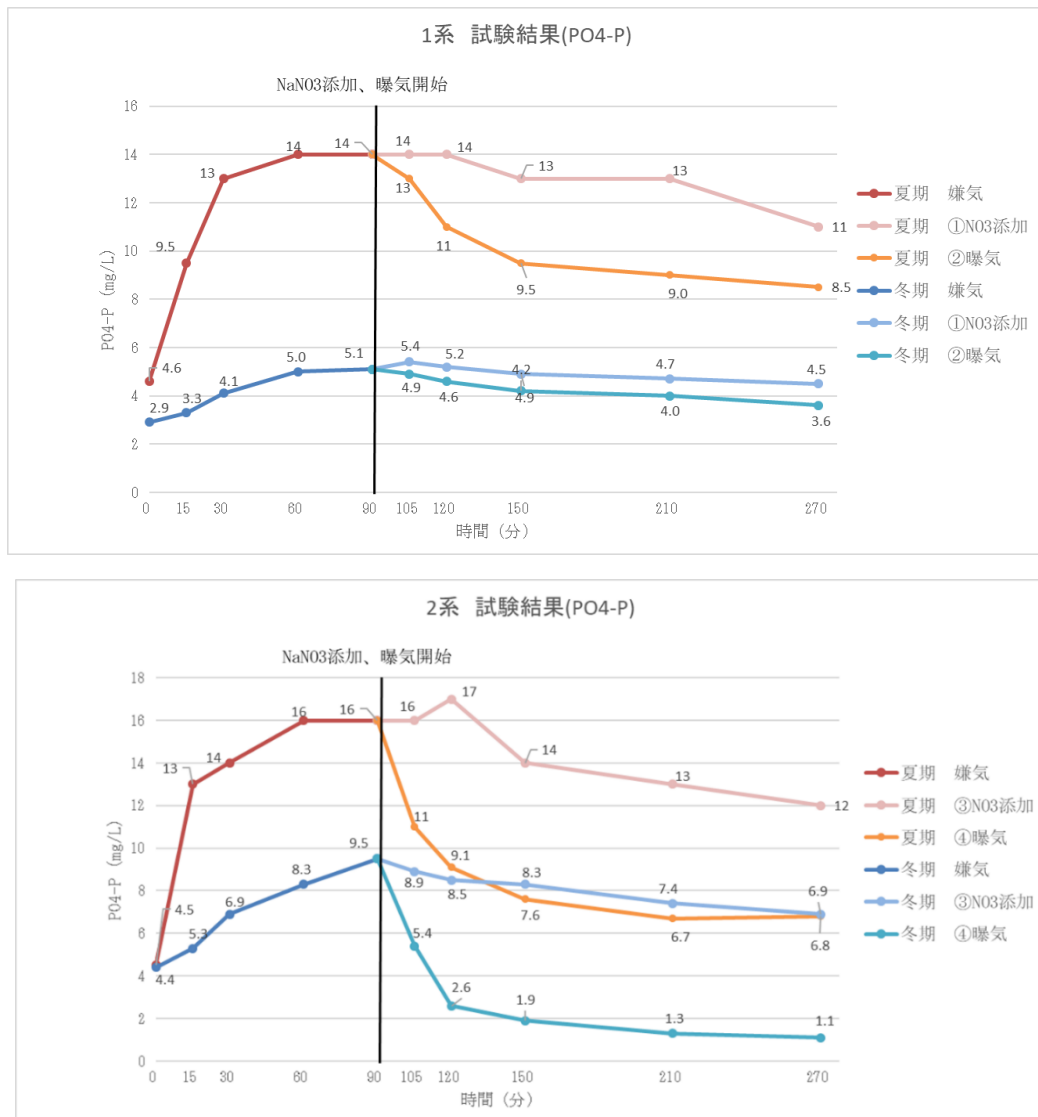


図-2 本場 1 系、2 系でのりん酸態りんの挙動

4. 考察

(1) 嫌気/無酸素条件でのりん摂取について

試験開始後、嫌気/無酸素状態とした条件①、③ではりんの摂取が見られた。これは、NO_x を利用してりん摂取を行う DN-PAOs によるものと考えられる。

DN-PAOs は脱窒しながらりんを摂取する。そのため、無酸素条件下では、NO_x 濃度の低下が見られるはずである。嫌気/無酸素状態での NO_x の挙動を図-3 に示す。

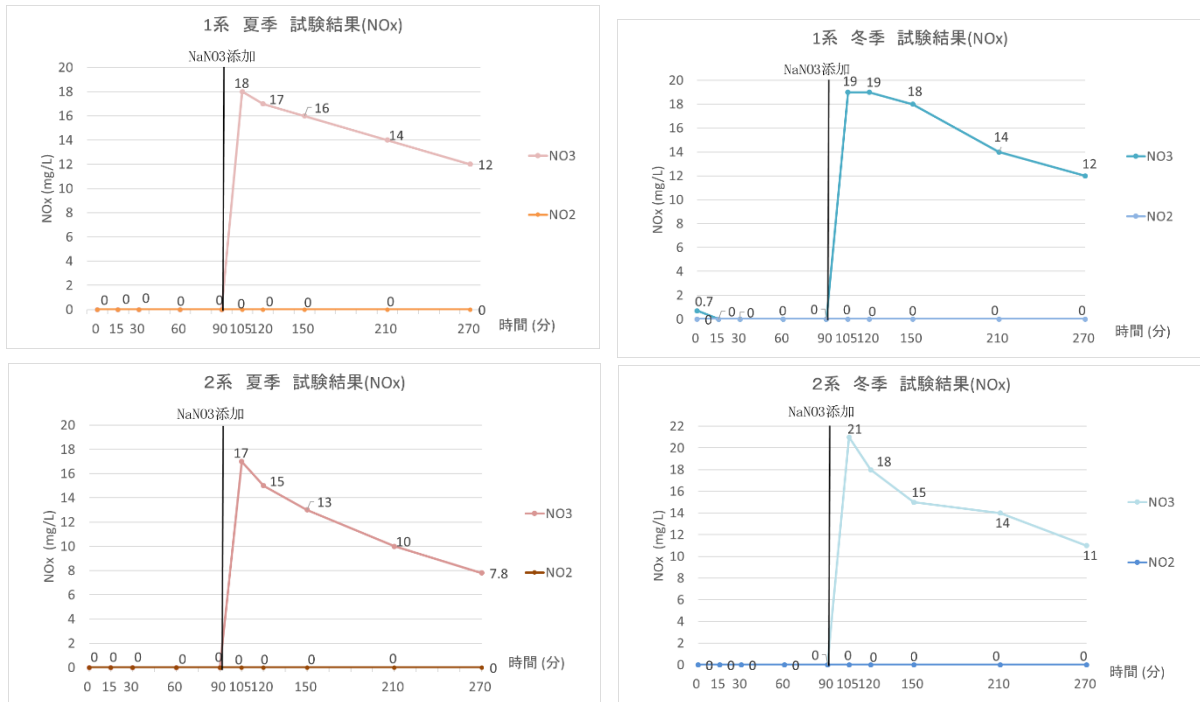


図-3 嫌気/無酸素条件での NO_x の挙動

いずれの結果も、試験時間 90 分の硝酸ナトリウム添加時に、硝酸態窒素濃度が上昇した後、試験終了の 270 分まで低下し続けている。硝酸態窒素濃度の低下は、脱窒によるものと考えられる。しかし条件による特徴が見られず、どの条件も一様に 10 ± 2 mg/L 付近まで低下した。今回用いた 1 系・2 系の活性汚泥の実施設での硝化・脱窒状況、りん除去状況は全く異なる。そのため、この硝酸態窒素濃度の一様な低下は、DN-PAOs よりも従属栄養細菌による脱窒の影響が大きかったためと考えられる。

(2) 嫌気/好気条件でのりん摂取について

嫌気/好気条件では各試験条件に特徴的なデータが得られた。表-2 は各条件でのりん摂取量、及び吐出量を MLSS あたりに換算し、まとめたものである。1 系の夏、冬及び 2 系の夏ではりん吐出量よりりん摂取量が少ない結果となった。対して 2 系の冬では、りん吐出量よりりん摂取量が多いという結果となった。これらの結果の違いについて以下で考察する。

	mg/g-MLSS	
	りん吐出量(嫌気下)	りん摂取量(好気下)
1系夏	5.0	2.9
1系冬	1.0	0.67
2系夏	5.2	4.2
2系冬	2.6	4.2

表-2 各条件のりん吐出量と摂取量

表-3にて試験実施時の各系列の運転状況をまとめた。1系夏、冬、2系冬では、硝化促進運転及び脱窒抑制運転が行われていた。対して、2系の冬では硝化抑制運転を行っていた。各条件で使用した返送汚泥の分析結果を示した表-4より、硝化促進及び脱窒抑制を行う系ではアンモニア態窒素、亜硝酸態窒素はほとんど残留していないことから、硝化が進んでいるものと考えられる。また、硝化抑制を行う冬季の2系では亜硝酸態窒素、硝酸態窒素がともに残留しておらず、未硝化の状態と考えられる。

	通常期 5月～9月(夏)		栄養塩管理運転期 10月～4月(冬)	
	1系	2系	1系	2系
処理方式	硝化促進運転	硝化促進運転	脱窒抑制運転	硝化抑制運転
特徴	2段階ステップ流入により窒素除去を優先	循環式硝化脱窒法嫌気区間を十分設けてりん除去を優先	返送率を下げる等により脱窒を抑制	空気量の削減等で硝化を抑制
嫌気：好気比	嫌気：好気：無酸素：好気比 3：6：3：6	7:11	嫌気：好気：無酸素：好気比 3：6：3：6	10:8
返送率	88%程	80～90%	70%程	60%程
処理水質※	T-N：5.4 mg/L N-NH ₄ ：0.2 mg/L N-NO ₂ ：<0.1 mg/L N-NO ₃ ：4.7 mg/L T-P：1.9 mg/L	T-N：9.6 mg/L N-NH ₄ ：0.2 mg/L N-NO ₂ ：<0.1 mg/L N-NO ₃ ：8.8 mg/L T-P：0.31 mg/L	T-N：19 mg/L N-NH ₄ ：2.6 mg/L N-NO ₂ ：<0.1 mg/L N-NO ₃ ：15 mg/L T-P：2.8 mg/L	T-N：34 mg/L N-NH ₄ ：34 mg/L N-NO ₂ ：0.1 mg/L N-NO ₃ ：<0.1 mg/L T-P：0.21 mg/L

※通常期：R4.8.23採水結果 栄養塩管理運転期：R4.1.5採水結果

表-3 各系での運転状況

	mg/L				
	MLSS	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	PO ₄ -P
1系 夏	4300	<0.1	<0.1	1.3	2.7
2系 夏	4800	0.8	<0.1	1.6	1.4
1系 冬	6000	0.7	<0.1	2.6	3.0
2系 冬	4100	29	0.2	<0.1	4.4

表-4 返送汚泥の分析結果

上記の結果から、実施設での PAOs の挙動について、以下の仮説を立てた。

(1 硝化促進運転、脱窒抑制運転を行った場合 (1 系夏、冬、2 系夏))

硝化促進運転、脱窒抑制運転の場合、好気槽でのアンモニア酸化菌 (AOB)、亜硝酸酸化菌 (NOB) の働きにより NO_x が生じる。DN-PAOs はこの NO_x を利用して、りんを摂取しているものとする。また、好気槽では酸素を利用してりん摂取を行う好気性 PAOs も存在する。そのため、好気槽では、DN-PAOs と好気性 PAOs が共存し、ともに下水中のりん除去を担っている。

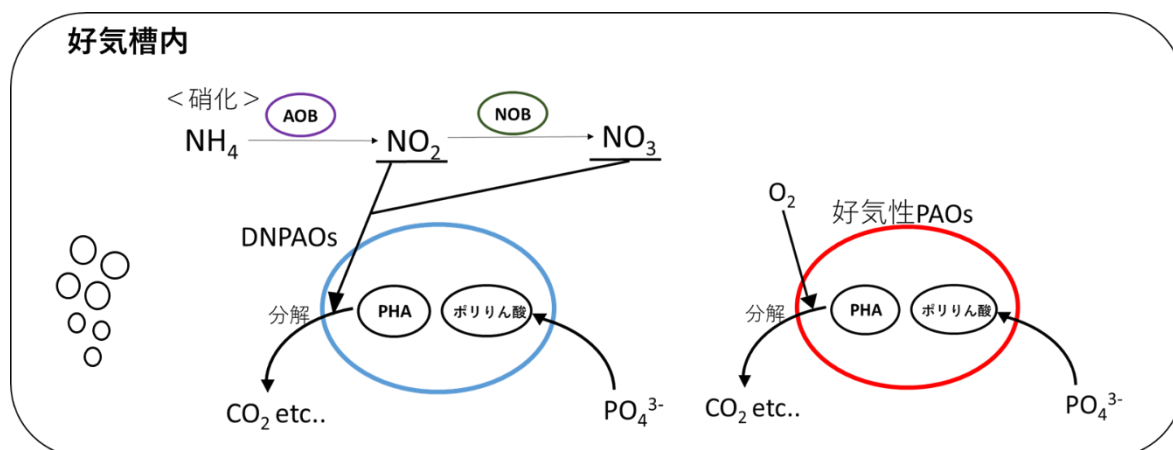


図-4 仮説 1) の概略図

(2 硝化抑制運転を行った場合 (2 系冬))

硝化抑制運転では、栄養塩類濃度の確保のため、空気量を絞る等して硝化を抑えている。表の処理水質、また表の返送汚泥の結果から、窒素系はアンモニア態窒素のみであり、AOB, NOB の働きが弱い。DN-PAOs は NO_x を利用できないため、存在できない。好気槽内の PAOs は酸素を利用する好気性 PAOs のみ存在している。

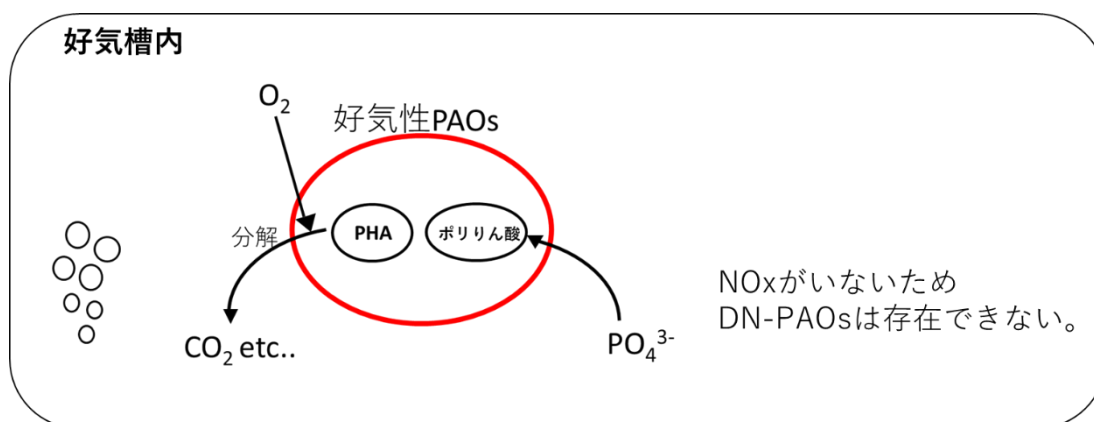


図-5 仮説 2) の概略図

仮説(1)では、好気条件での DN-PAOs のりん摂取は、AOB や NOB による NO_x の発生を前提としている。しかし本調査で行った回分式試験では、全ての条件で、試験開始時に硝化を抑制する ATU を加えている。そのため、嫌気/好気条件の回分試験では、汚泥中に存在する DN-PAOs が NO_x を利用できないため、働きが抑制されたのではと考えている。

硝化促進運転を行っていた 1 系夏、2 系夏と、脱窒抑制運転を行っていた 1 系冬の条件でりんの過剰摂取が見られなかったのは、ATU 添加により、DN-PAOs によるりん摂取分が失われたためと考えている。

対して、硝化抑制運転を行っていた 2 系冬でりんの過剰摂取が見られたのは、仮説(2)より、汚泥中には好気性 PAOs しかおらず、ATU 添加による影響を受けなかったためと考えている。

5. 次回に向けて

本調査で回分式試験を実施したところ、嫌気/無酸素条件でりんの摂取が見られたことから、活性汚泥中に DN-PAOs が存在することが確認できた。

また、嫌気/好気条件では、硝化抑制運転を行う 2 系冬以外の条件で、りんの過剰摂取が見られなかった。これは、好気条件下での NO_x 発生を前提とした、DN-PAOs によるりん摂取が ATU 添加により抑制されたためと考察した。

今回の調査では、本報告の考察が妥当かどうか検証したい。具体的には、以下のとおりである。

- ・りんの過剰摂取が見られなかったのは ATU を添加したことにより起きたと考えられる。そのため、嫌気/好気条件で、ATU を添加したものと添加していないもので結果を比較する。
- ・本報告では、実施設の好気槽で DN-PAOs と好気性 PAOs は共存しており、DN-PAOs は脱窒しながらりんを摂取していると仮説を立てた。これが正しいければ、好気条件での脱窒が確認できるはずである。そのため、好気条件下での硝酸添加や、全窒素の挙動調査により脱窒を確認したい。

6. 参考文献

- 1) 微生物を利用した窒素・リン同時除去に関する高度排水処理プロセス技術調査報告書
財団法人造水促進センター, 第 5 章脱窒性リン蓄積細菌
- 2) 脱窒性リン蓄積菌を活用した低動力下水処理プロセスの開発
EICA, 第 17 号(2012)
- 3) Wachtmeister, A., Kuba, T., van Loosdrecht, M.C.M. and Heijnen, J.J. (1997) A sludge characterization assay for aerobic and denitrifying phosphorus removing sludge.

7. 分析データ

分析項目		MLSS	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	T-N	PO ₄ -P	T-P	BOD	COD	SS	VFAs
1系返送汚泥		4270	<0.1	<0.1	1.3		2.7					
2系返送汚泥		4760	0.8	<0.1	1.6		1.4					
初沈流出			26			28	2.5	3.5	81	39	24	13
I	t0	1870	13	<0.1	<0.1		4.6					<5.0
	t1		14	<0.1	<0.1		9.5					<5.0
	t2		14	<0.1	<0.1		13					<5.0
	t3		14	<0.1	<0.1		14					<5.0
	t4		14	<0.1	<0.1		14					<5.0
II	t0	2230	13	<0.1	<0.1		4.5					<5.0
	t1		14	<0.1	<0.1		13					<5.0
	t2		14	<0.1	<0.1		14					<5.0
	t3		14	<0.1	<0.1		16					<5.0
	t4		14	<0.1	<0.1		16					<5.0
条件①	t5		14	<0.1	18		14					
	t6		14	<0.1	17		14					
	t7		14	<0.1	16		13					
	t8		14	<0.1	14		13					
	t9		14	<0.1	12	32	11		4.9	11		
条件②	t5		14	<0.1	<0.1		13					
	t6		14	<0.1	<0.1		11					
	t7		13	<0.1	<0.1		9.5					
	t8		13	<0.1	<0.1		9.0					
	t9		13	<0.1	<0.1	24	8.5		6.4	16		
条件③	t5		14	<0.1	17		16					
	t6		14	<0.1	15		17					
	t7		14	<0.1	13		14					
	t8		14	<0.1	10		13					
	t9		15	<0.1	7.8	25	12		3.7	11		
条件④	t5		13	<0.1	0.1		11					
	t6		13	<0.1	0.1		9.1					
	t7		13	<0.1	0.1		7.6					
	t8		13	<0.1	0.2		6.7					
	t9		12	<0.1	0.2	35	6.8		5.3	12		

表-5 夏季における1系、2系の結果

分析項目		MLSS	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	T-N	PO ₄ -P	T-P	BOD	COD	SS	VFAs
1系返送汚泥		6000	0.7	<0.1	2.6		3.0					
2系返送汚泥		4100	29	0.2	<0.1		4.4					
初沈流出			36			46	2.6	3.8	83	47	43	<5.0
I	t0	2300	22	<0.1	0.7		2.9					<5.0
	t1		21	<0.1	<0.1		3.3					<5.0
	t2		21	<0.1	<0.1		4.1					<5.0
	t3		21	<0.1	<0.1		5.0					<5.0
	t4		22	<0.1	<0.1		5.1					<5.0
II	t0	2000	31	<0.1	<0.1		4.4					<5.0
	t1		32	<0.1	<0.1		5.3					<5.0
	t2		30	<0.1	<0.1		6.9					<5.0
	t3		31	<0.1	<0.1		8.3					<5.0
	t4		33	<0.1	<0.1		9.5					<5.0
条件①	t5		22	<0.1	19		5.4					
	t6		23	<0.1	19		5.2					
	t7		22	<0.1	18		4.9					
	t8		23	<0.1	14		4.7					
	t9		23	<0.1	12	36	4.5		3.9	12		
条件②	t5		22	<0.1	0.2		4.9					
	t6		22	<0.1	<0.1		4.6					
	t7		21	<0.1	<0.1		4.2					
	t8		21	<0.1	<0.1		4.0					
	t9		21	<0.1	0.2	26	3.6		4.8	16		
条件③	t5		32	0.2	21		8.9					
	t6		32	<0.1	18		8.5					
	t7		31	<0.1	15		8.3					
	t8		31	<0.1	14		7.4					
	t9		34	<0.1	11	48	6.9		7.0	16		
条件④	t5		33	0.5	<0.1		5.4					
	t6		31	<0.1	<0.1		2.6					
	t7		30	0.3	<0.1		1.9					
	t8		30	<0.1	<0.1		1.3					
	t9		30	<0.1	<0.1	36	1.1		6.1	15		

表-6 冬季における1、2系の結果