

嫌気-無酸素-好気汚泥のグラニュール化の試み

日本大学 学生会員 ○小堀貴弘
日本大学 非会員 森 亮
日本大学 非会員 藤原祐貴
日本大学 正会員 齋藤利晃

1. はじめに

富栄養化の原因とされる窒素やリンを同時に除去するシステムとして DEPHANOX プロセスが提唱されている。このプロセスは図 2 にあるように、活性汚泥は嫌気-無酸素工程を、上澄み液は嫌気-無酸素-好気工程を経るプロセスで、窒素・リン同時除去における脱窒性脱リン細菌(以後、D-PAOs)の酸素暴露の影響を考えた場合に最も有効な処理プロセスであるといわれている。しかし、中間沈殿池で固液分離を行う関係で処理の複雑化と敷地面積の広大化、すなわち処理速度の低下という欠点が指摘されている。

一方で近年、好気性微生物の自己固定化能を用いた好気性グラニュールによる窒素・リン除去法の開発が進められている。これは、嫌気性処理における UASB 法と同様に、数 mm 程度までに成長する強度のある自己造粒汚泥を用いた処理法で、グラニュール内部で様々な環境条件を形成することができ、硝化、脱窒および脱リンを同時に行うことができる。また、沈降速度に優れ、汚泥濃度も高められるので、反応槽を飛躍的に小型化できることが期待されている。しかし、グラニュール形成のための環境条件を整えるために、繊細な DO および ORP 制御が必要であることや、筒型の反応器で上向流を維持するために膨大な循環ポンプのエネルギーを要することが課題である。

そこで我々は、嫌気-無酸素工程下で培養された D-PAOs が、非常に強固で沈降性の良いフロックを形成する事に注目し、回分式の外部硝化型嫌気-無酸素処理法にグラニュール法を適用する事を考案した。嫌気-無酸素処理法汚泥のグラニュール化に成功すれば、グラニュール特有の高い固液分離性から DEPHANOX プロセスの欠点とされる処理速度の低下を補えるのではないかと考える。ここでは、嫌気-無酸素-好気工程下で培養された汚泥のグラニュール形成の有無と、その窒素・リン除去性能について述べる。

2. 実験方法

Run1

培養は、有効容積 4L の回分式反応槽に、種汚泥として中川処理場 A₂O 法の反応槽から採取した汚泥を投入し、1cycle360 分(嫌気 150 分、無酸素 150、

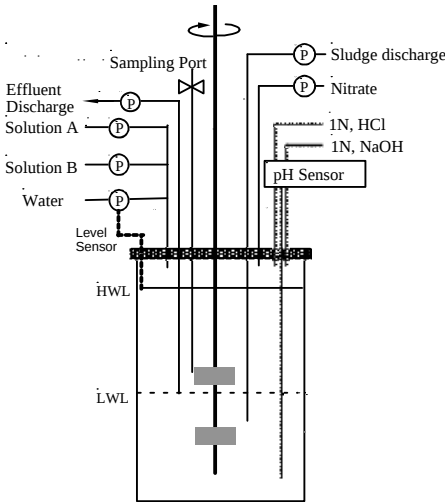


図 1 リアクター概念図

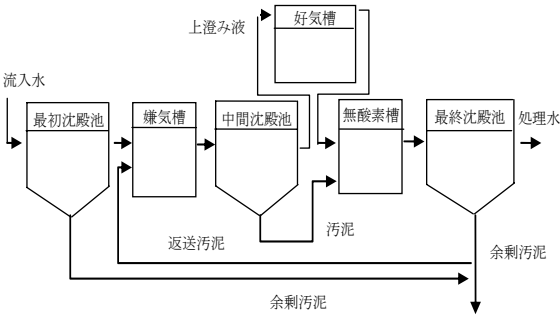


図 2 DEPHANOX プロセスの処理フロー

表 3 人工排水の組成

PO ₄ -P	(mgP/l)	10
T-N	(mgN/l)	30
COD	(mgCOD/l)	200

キーワード:生物学的リン除去 グラニュール 脱窒性リン蓄積細菌

連絡先: 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14 日本大学理工学部 TEL 03-3259-0875

好気 30 分、沈殿 5 分、排水 5 分、待機 20 分)、無酸素工程のはじめから 1 時間に硝酸カリウムを流



図 3 1cycle の工程

入水換算 30 (mg/l) になるよう添加し、排水時の引き抜きを 2L (HRT12 時間) で運転した (図 3)。また、反応槽内の攪拌速度を 100rpm とし、余剰汚泥の引き抜きは行っていない。培養に用いた流入水は表 1 にあるように調整された人口排水で、有機物は酢酸カリウムとペプトン、不溶性性デンプンを COD 比 2:1:1 に調整し投入した。また、その他流入成分は表 3 のようになっている。この運転の特色として、沈殿時間を 5 分と著しく短縮し、余剰汚泥の引き抜きを行っていない点が挙げられる。この沈殿時間を 5

表 4 Trace Elements の組成

成分	mg/ml
EDTA	10
FeSO ₄ ・7H ₂ O	1.54
H ₃ BO ₃	0.15
CuSO ₄ ・5H ₂ O	0.03
Na ₂ MoO ₄ ・H ₂ O	0.06
ZnSO ₄ ・H ₂ O	0.12
CoCl ₂ ・H ₂ O	0.15
MnCl ₂ ・4H ₂ O	0.12
KI	0.18

表 3 人工排水の組成

有機物類	
成分	mg/l
CH ₃ COOK	153
Poly-Pepton	43
(C ₅ H ₁₀ O ₅) _n	46
Yeast Extract	2
栄養塩類	
成分	mg/l
NH ₄ Cl	300
CaCl ₂	53
NaH ₂ PO ₄ ・2H ₂ O	11
K ₂ HPO ₄	25
MgSO ₄ ・7H ₂ O	28
Trace Elements	6 (ml)

分とした背景は、他の知見からグラニユーール形成の条件として、i 汚泥沈殿時間の著しい短縮、ii 適切なせん断応力の付与、iii 増殖速度の遅い微生物のセレクションが挙げられている¹⁾ことから沈殿工程時間を著しく短くすることにより、沈降性の悪い汚泥を系外へ排出し、反応槽内に沈降性の高い汚泥を選択的に蓄積して、グラニユーール形成を促進させるためである。

Run2

沈殿時間を 5 分として運転を行っていたが、グラニユーール形成の兆しは見られず、グラニユーール化の利点の一つである良好な沈降性も得ることができなかったことから沈殿時間を 2 分と更に短縮し、また適切なせん断応力を与えるために攪拌速度を 250rpm としして運転を行った。

Run3

Run2 の条件で培養したところ、次第にリン除去性能が低下し、汚泥量も減少をした。これに伴い、流入水の有機物成分からデンプンを抜き、ペプトンを COD 換算で 100 (mgCOD/l) になるよう調整し運転を行った。これにより流入水中の有機物組成は酢酸カリウムとペプトンが COD 比 1:1 となった。

このように実験はそれぞれ 3 つの期間に分かれて行われ、期間による運転条件の違いは表 4 の通りである。Run1 と Run2 では運転操作上の違いが、Run2 と Run3 では流入有機物に違いがある。

表 4 各 Run の運転条件の違い

	day	沈殿時間 min	攪拌速度 rpm	有機物組成 mgCOD/l
Run1	0-52	5	100	酢酸:100 ペプトン:50 デンプン:50
Run2	54-91	2	250	酢酸:100 ペプトン:50 デンプン:50
Run3	94-	2	250	酢酸:100 ペプトン:100

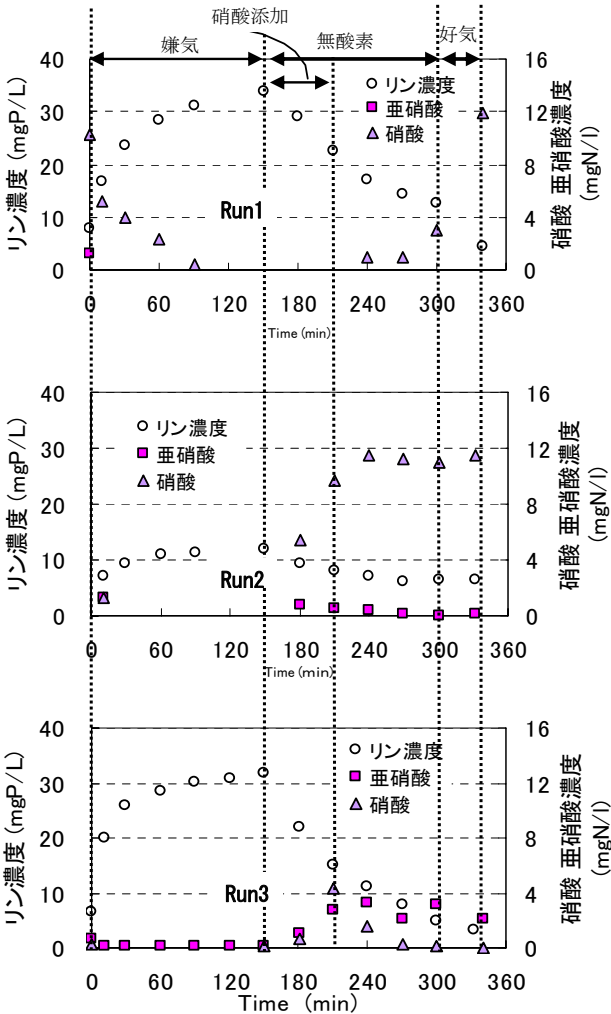


図 4 各サイクルの代表的な Cycle 変化

結果

図4に各Runの典型的なCycle変化を示す。どの期間も運転開始と同時に嫌気工程でリン酸の放出があり、反応槽内のリン酸濃度が上昇する。そして150(min)からの硝酸の添加により、混合液中のリン濃度が低下し、300(min)好気工程化で更にリン除去が進行する。しかし、各運転期間によって、リン酸放出量や摂取量、および硝酸摂取量に違いがあり、特にRun2と他のRunではその差は明瞭である。この違いは如実に経日変化にも現れた。図5に各種指標の経日変化を示す。

Run1

運転開始と共にリン酸摂取量とP/N比が伸びた。このことから、D-PAOsが硝酸を電子受容体として用いてリン酸摂取を行えているのがわかる。また、開始当初500(mgSS/l)前後だった汚泥量も増加し、40日目で2000(mgSS/l)を記録した。その一方

で、SVI値は運転開始当初から160(mg/l)前後を示し、グラニュール形成の利点である良好な沈降性を得ることはできなかった。その原因として、好気工程の終了と共に汚泥は速やかに沈降するものの、沈殿した汚泥が底部で圧密しなかったことが考えられる。MLSSが増加していることからわかるとおり、汚泥が5分という沈殿時間に対応できなかったわけではなく、沈降性の高い汚泥は選択的に蓄積できたものの、せん断応力負荷が小さかったことから、汚泥自体の密度が小さかったと推察される。

Run2

沈殿時間を5分から2分に短縮したことにより、汚泥量が急激に減少し、Run1の約半分程度となった。その影響からか、図4にある通り無酸素工程下で硝酸摂取量が著しく減少し、リン酸摂取量も低下した。また、沈殿時間を短縮し、更に高いせん断応力負荷を与えたものの、グラニュール化の傾向は見られず、SVIも期待したほど低下せずに130(mg/l)程度で停滞した。

Run3

運転条件変更と共にリン酸摂取量は向上し、Run2で1000(mgSS/l)程度だった汚泥量も、131日目に3350(mgSS/l)を記録した。また、Run1・Run2とほぼ変化のなかったVSS/SS比とSVIが急激な低下を示した。特にSVIではその傾向が顕著で、131日目に55(mg/l)を記録した。グラニュール形成のひとつの目安としてSVI50以下が挙げられていることから、この数値は非常に良好なものであるといえる。これらのことから、デンプンの有無がD-PAOsと他の従属栄養細菌の競合関係に何らかの影響があったと考える。しかし、反応槽内に沈降性の高い汚泥を蓄積できたが、汚泥の粒径は0.1(mm)程度にとどまり、グラニュール化には至らなかった。

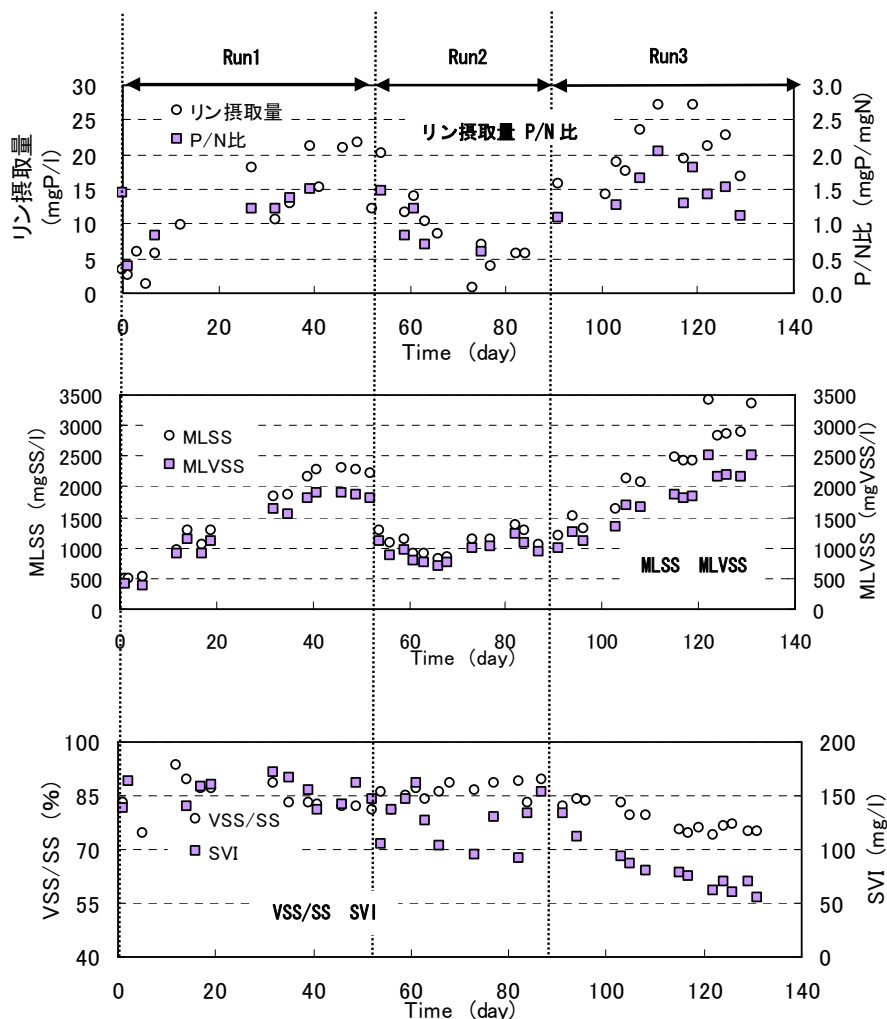


図5 各指標の経日変化

考察

各期間の定常状態におけるリン放出量、リン摂取量、およびリン除去量の平均値を表 5 に、汚泥濃度、SVI の平均値を表 6 に示す。表 5、および表 6 から全体を通してどの値も Run3 が優れているのがわかる一方で、SVI 以外の全ての指標で Run2 が最も悪い値を示した。しかし、Run3 と Run2 の運転条件の違いは表 4 にある通り不溶解性デンプンの有無だけであり、その他攪拌速度や沈殿時間に違いはない。これらのことから、不溶解性デンプンが、D-PAOs と他の従属栄養細菌の競合関係になんらかの影響を与えたことが推測される。このことは系外に排出される排水に含まれる汚泥量にも現れた。表 5 にある通り、排水に含まれる汚泥量に明らかな違いがあり、Run2 と Run3 では排水含有汚泥量に約 3 倍の開きがあり、Run2 の方が沈降性の低い汚泥がより多く含まれていることがわかる。

一般に D-PAOs は体内にポリリン酸を蓄積させることから他の細菌よりも VSS/SS 比が低いことが知られている。D-PAOs が優占化されると VSS/SS 比が低下するのは先に述べた通りであるが、Run2 と Run3 では反応槽内、および排水含有汚泥共に VSS/SS 比に明らかな違いがある。このことからデンプンの有無が D-PAOs と従属栄養細菌の競合関係に影響を及ぼしていた可能性が考えられる。

一方で、Run1 ではデンプンがあるにもかかわらず Run2 ほどのリン除去性能の低下は起こらなかった。Run1 と Run2 では沈殿時間と攪拌速度が異なることから、この運転条件の変更が影響したと考えられる。しかし、Run1 から Run2 へ移行と同時に汚泥量は急激に低下し、その後も低い水準で推移していくが、P/N 比は Run2 当初である 56 日目では 1.5(mgP/mgN)を示している。このことから、運転条件の変更は D-PAOs に直接的な影響を与えたわけではなく、運転条件の変更により、汚泥量が減少、それにより硝酸や有機物が過負荷となり、結果、後のリン除去性能の低下につながったと推測される。

まとめ

嫌気-無酸素-好気汚泥のグラニューール形成を試みたが、全ての期間においてグラニューール形成の兆しは見られなかった。また、強いせん断応力を与えた場合に易分解性有機物であるデンプンが D-PAOs とその他の従属栄養細菌の競合関係に影響を与えることがわかった。このことから、この処理プロセスの安定性は流入有機物成分に依存することとなり、有機物成分が不安定因子になることが示唆された。一方で、グラニューール化には至らなかったものの、良好な沈降性を有した汚泥を選択的に集積することに成功すると共に、著しく短い沈殿工程時間と強いせん断応力が D-PAOs の集積培養に直積的な影響を与えないことがわかった。

今後は Run3 の条件からせん断応力を弱めることにより、嫌気-無酸素-好気汚泥がグラニューール化されるか検討する。

参考文献

- 1) 岸田直裕ら 2006 水処理技術 Vol 47, No.8 p1-7
- 2) 末広文一ら 2006 下水道研究発表会講演集 Vol 43 p842-844

表 5 各 Run におけるリン酸濃度平均値

	期間	リン濃度			
		放出量	摂取量(無酸素)	摂取量(好気)	除去量
	day	mgP/l	mgP/l	mgP/l	mgP/l
Run1	0-52	21.9	18.4	5.8	3.3
Run2	54-91	9.3	5.1	1.2	2.2
Run3	94-131	24.9	22.0	6.8	7.9

表 6 各 Run における MLSS, MLVSS および SVI 平均値

	期間	汚泥量			沈降性
		MLSS	MLVSS	VSS/SS	SVI
	day	mgMLSS/l	mgMLVSS/l	%	mg/l
Run1	0-52	2250	1850	82	148
Run2	54-91	1230	1050	86	128
Run3	94-131	3070	2310	76	64

表 7 排水含有汚泥量の平均値

	期間	排水汚泥		
		MLSS	MLVSS	VSS/SS
	day	mgMLSS/l	mgMLVSS/l	%
Run2	54-91	65	56	86
Run3	94-131	19	13	76