

(21) 好気性生物膜によるPVAを有機炭素源とした脱窒に関する研究

Denitrification using PVA as an organic carbon source with aerobic biofilms

方 斗連* 李 玉友* 野池達也* 渡辺義公**

Du-Yeon Bang*, Yu-You Li*, Tatsuya Noike*, Yoshimasa Watanabe**

ABSTRACT: Performance of a denitrification process using polyvinyl alcohol (PVA) as a organic carbon source was investigated by anoxic and aerobic RBC systems at 25 °C and 30 °C. PVA was well degraded under aerobic condition, but not under anoxic condition. In the experiment using phenol as a co-organic substrate for PVA degradation, the efficiency of denitrification increased from 38% to 84% as the TOC loading rate increased from 1g/m².d to 4.2g/m².d, while PVA-removal and nitrification efficiencies were above 90% throughout all the experiments. In the experiment using PVA as the sole organic carbon source, the efficiencies of PVA removal and nitrification increased with increasing HRT, and reached levels of 95%, and 99%, respectively at an HRT of 10 hours, whereas the efficiency of denitrification reached its maximum value of 78% at an HRT of 8 hours. These results indicated that PVA could be used as a sole electron donor for denitrification and that the optimum HRT for the simultaneous removal of PVA and nitrogen was between 8 and 10 hours. The PVA-decomposing bacteria, nitrifiers, and denitrifiers co-existed in the biofilm, but the populations of PVA-decomposing bacteria and denitrifiers in the surface layer were 1 to 2 orders of magnitude higher than those in middle and bottom layers indicating that the surface layer had a higher denitrifying activity.

KEYWORDS: Aerobic biofilm, bacterial population, denitrification, nitrification, phenol, polyvinyl alcohol (PVA)

1. はじめに

Polyvinyl alcohol (PVA) は、ビニロン合成繊維の原料、繊維サイジング剤、フィルム及び紙加工剤、接着剤等として広く使用されている水溶性合成高分子物質であり、繊維(糊抜き廃水)、製紙工場等からは50-700mg/lの高濃度で排出されている。PVAは生物学的難分解性物質^{1,2)}であるため、その処理方法の開発が注目されて来た。橋本ら³⁾は高濃度活性汚泥プロセスでSRTを長く維持することにより、微生物によるPVAの除去が可能であることを報告した。著者ら⁴⁾は、好気性回転生物膜を用い、PVA-の生物学的処理が可能であることを報告している。

近年、富栄養化の防止の観点から下水処理を脱窒、脱磷まで高度化して行く必要性が認識され、生物学的脱窒プロセスが普及されつつある。脱窒反応を進行させるためには電子供与体(H-donor)として有機炭素源を必要とするので、排水に含まれる有機炭素源が不足した場合には外部から添加しなければならない。これまで添加有機炭素源としてメタノールが多く用いられているが、これは処理費用の上昇を

*東北大学工学部土木工学科 (Department of Civil Engineering, Tohoku University)

**北海道大学工学部衛生工学科 (Department of Sanitary Engineering, Hokkaido University)

招くものとして指摘されている。そこで脱窒の代替電子供与体として排水中に含まれる有機物の利用を初め、硫黄⁶⁾、メタンガス⁶⁾等広範囲な物質の使用が提案されている。Harish Pesari⁷⁾は軍需品製造工場廃水中に含まれている現在まで生物学的難分解性物質として知られているNG(nitroglycerin)を脱窒有機炭素源とする可能性を実験的に検討し、NGが脱窒の有機炭素源として用いることが出来ることを発表している。

本研究では、生物学的難分解性物質のPVAを脱窒プロセスの有機炭素源として用いる可能性を実験的に検討したことに加え、好気性生物膜によるPVA分解、硝化・脱窒の同時進行及びその生物膜の細菌構造について研究を行った。

2. 実験装置及び方法

2.1 実験装置

本研究に用いた実験装置は図1に示すような回転生物接触装置であった。円板の材質はアクリルで、反応槽の容積は2.7L、円板の枚数は10枚、円板の表面積は0.41m²、浸積率は50%であった。増殖した生物膜内の細菌群の分布を調べるために、支持体の一部を自由に取り外せるプレートを装着した。

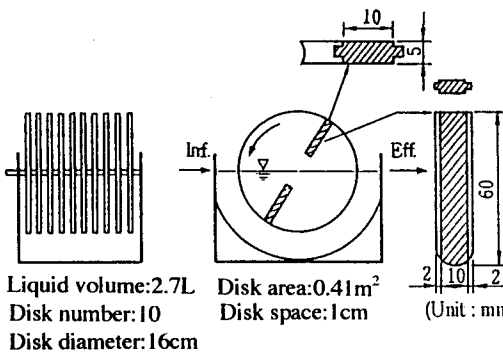


Fig.1 Process flow diagram and RBC design

2.2 供試廃水

本実験に用いた廃水は表1に示すようなPVAを含む人工合成基質(pH7.4-7.8)であり、PVAは重合度1,500、鹸化度98%以上のものを用いた。生物膜の形成を促進させるためにフェノールも添加した。

Table 1 Composition of the synthetic wastewater

Constituents	mg/L
Polyvinyl alcohol	variable
Phenol	variable
(NH ₄) ₂ SO ₄	variable
KH ₂ PO ₄	400
Na ₂ HPO ₄	50
CaCl ₂	10
MgSO ₄ · 7H ₂ O	180
FeSO ₄ · 7H ₂ O	10
NaCl	10
K ₂ HPO ₄	500
NaHCO ₃	variable
MnSO ₄ · 7H ₂ O	7
KNO ₃	variable

2.3 種汚泥の馴養

種汚泥は、硝化が良好に行われている都市下水処理場の好気性RBC装置の微生物にPVAを含有する人工合成基質を投入し馴養した。

PVA分解細菌を早く増殖させる目的で合成基質に酢酸ナトリウム、グルコース、フェノールを共存基質としてそれぞれ加えた結果、酢酸ナトリウム及びグルコースを用いた場合においては、4カ月間馴養してもPVA分解が認められなかったが、フェノールを共存基質として用いた場合においては、約2週間の馴養期間でPVA分解能の高い種汚泥が得られた。

これらの結果から、本実験ではPVA含有廃水に約2カ月間馴養したもの(Run1,2,3,4の実験用)、PVAとフェノールに約2年間馴養したもの(Run5,6,7,8の実験用)をそれぞれ種汚泥として用いた。Run5,6,7,8の実験開始の時は分解能が高い種汚泥を用い、有機源としてPVAのみを用い生物膜を形成させて見たが、2カ月間経っても生物膜の形成はうまく出来なかったため、生物膜成長の促進のためにフェノールを共存基質として加えた。

2.4 実験の操作条件

表一2に本研究の実験条件を詳しくまとめている。本研究では三つの実験を行った。実験1 (Run 1からRun 4 まで)では無酸素および好氣的条件におけるPVAの分解挙動を検討した。Run1,2,3の実験においては無酸素条件を維持するために反応槽上部にカバーをした。また実験を始めた時、無酸素条件を作り出すために、反応槽内部に窒素ガスを吹き込むことによって酸素を追い出した。実験2 ではフェノールをPVA分解の誘導物質として用い、好気性RBCシステムにおけるPVAの除去、硝化及び脱窒素の同時進行について水理学的負荷を変化させて (Run5からRun 7まで) 実験を行った。実験3では、PVAを唯一の有機炭素源として用い、HRTを2時間から10時間まで変化させて単一好気性RBCシステムによる硝化、脱窒素の効率を検討した。

Table 2 Summary of experimental conditions

Exp. No.	Run No.	Oxygen condition	HRT (hr)	temp. (°C)	Rotation speed(rpm)	Operation period (days)	TOC loading rate(g/m ² . d)	Characteristics of influent (mg/l)
1	R-1	Anoxic	20	30	11	20	1.0	A 100, B 100, C 50
	R-2	Anoxic	20	30	11	34	3.2	A 200, B 400, C 100
	R-3	Anoxic	20	30	11	19	2.4	A 0, B 400, C 100
	R-4	Aerobic	10	30	11	15	4.2	A 200, B 200, D 43
2	R-5	Aerobic	40	25	10	30	1.0	A 200, B 200, D 78
	R-6	Aerobic	10	25	10	120	4.2	A 200, B 200, D 78
	R-7	Aerobic	20	25	10	200	2.0	A 200, B 200, D 78
3	R-8	Aerobic	variable	25	10	132	variable	A 200, B 0, D 78

Note, A=PVA, B=Phend, C=NO₃-N, D=NH₄-N

Table 3 The methods of bacterial counts

	PVA-decomposing bacteria	NH ₄ -N oxidizing bacteria	NO ₂ -N oxidizing bacteria	Denitrifiers
Method	MPN	MPN	MPN	MPN
Cultivation period(days)	28	28	28	14
Cultivation temperature(°C)	30±1	30±1	30±1	30±1

2.5 水質分析

pHはpH-メ-タ-、DOCはSimadzu TOC-5000でそれぞれ測定した。NH₄-N、NO₂-N及びNO₃-Nはイオンクロマトグラフィと下水試験法により測定した。PVAはJoseph.H.Finleyの方法⁸⁾で、フェノールは4アミノ-アンチピリン法(Standard Methods,1989)と液体クロマトグラフィでそれぞれ分析した。

2.6 各細菌群の計数

定常状態にある生物膜の細菌群構成を検討するために、あらかじめ支持体に装着したプレートを取り、層ごとにDSK マイクロスライサ-で切断した。プレートの採取地点は流入水の入口の方の円板から円板No. 1とし、プレートの採取時期はRun5で30日目、Run6で120日目、Run7で200日目にそれぞれ行った。

抜き取った生物膜はそのままマイクロスライサ-を用い、マイクロスライサの刃が14部に最初に接触したところを生物膜の表面とし、表面から深さ方向に20-100 μ mの厚さごとに切断した。切断された生物膜片を表層、中間層、底層の三つのグループに分け、それぞれホモジナイザ-で分散処理した後、PVA分解菌、硝化細菌、脱窒細菌、硝酸還元菌の計数を行った。各細菌群の培養には土壌微生物実験法⁹⁾を参考にし、それぞれの培養条件は表3に示す通りである。

PVA分解細菌の計数は表-4のPVA分解菌の培地¹⁰⁾を用い、MPN法で計数した。PVA分解菌の増殖は試験管における培養液の濁度増加(600nmのOD)によって判定した。

Table 4 Medium for enumeration of PVA-decomposing bacteria

Constituents	mg/L
Polyvinyl alcohol	1,000
(NH ₄) ₂ SO ₄	150
KH ₂ PO ₄	200
CaCl ₂	50
MgSO ₄ · 7H ₂ O	50
FeSO ₄ · 7H ₂ O	20
NaCl	20
K ₂ HPO ₄	1,600
Yeast extract	500

3. 実験結果と考察

3.1 無酸素 及び好気性条件におけるPVAの分解挙動

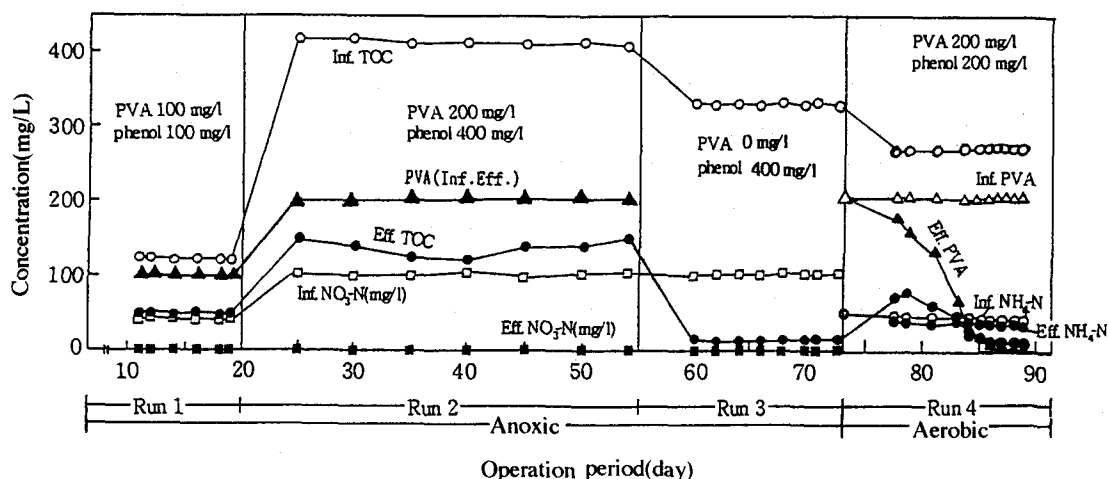


Fig. 2 Behavior of PVA and phenol under anoxic and aerobic conditions(experiment 1)

図-2に実験1におけるPVAおよびフェノールの分解挙動を示す。Run1,2,3,の無酸素条件で73日間運転しつづけた結果、フェノールはほぼ完全に分解されたのに対して、PVAの分解はまったく認められなかった。そこでRBCのカバーを外し、好気性条件 (Run 4) に変えて実験してみた。図-2に示したように、無酸素条件から好気性条件に変えると、流出水のPVAの濃度が顕著に減少する傾向が見られた。Run4の好气的条件に変えるとわずか15日間でPVAの除去率はほぼ100%に達した。

PVA分解には、共生関係にある好気性細菌*Pseudomonas putida* と*Pseudomonas* sp.が関与し、その分解酵素

はオキシダゼとハイドロラ-ゼから構成されていることが報告されている^{11,14}。また、中村と宮地¹⁵は *Pseudomonas putida*によるトリクロロエチレンの分解について研究し、その分解酵素はフェノールによって誘導されることを報告している。フェノールを共存基質として用いた本研究のRun4では、フェノールの分解細菌である *Pseudomonas putida*が多く増殖され、PVAを分解する *Pseudomonas*属の細菌の増殖を高め、PVA分解が促進されたと考えられる。

3.2 好気性生物膜によるPVAの分解と硝化・脱窒の同時進行

実験1より好気性回転生物膜を用いてPVAを完全に除去出来ることを明らかにした。そこで、実験2 (Run5,6,7) ではフェノール共存下でのPVAを有機炭素源として用い、好気性回転生物膜によるPVAの分解と硝化・脱窒の同時進行について検討した。図-3に実験2におけるPVAとフェノールの除去率、硝化率および脱窒率に及ぼすTOC-負荷の影響を示す。PVA、フェノール及びNH₄⁺を含む排水を処理した結果、TOC負荷を1g/m².dから4.2g/m².dまで増加させてもフェノールの除去率はほぼ100%に維持されたのに対して、PVA分解率と硝化率には若干の低下が見られた。また、脱窒率はTOC負荷の増加と共に増加した。TOC負荷が4.2g/m².dの条件では、PVA除去率、フェノール除去率、硝化率及び脱窒率はそれぞれ90%、100%、90%および84%であって、PVAの除去及び硝化、脱窒が同じ生物膜で良好に進行した。

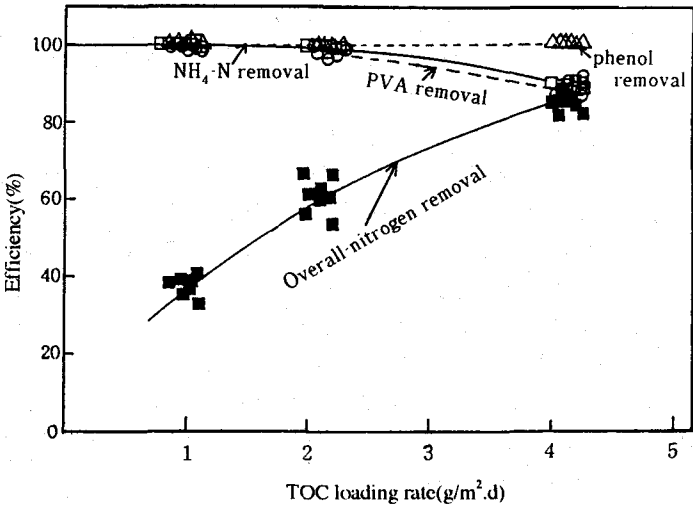


Fig. 3 Effect of TOC loading rate on the efficiencies of PVA,phenol and nitrogen removal under aerobic condition in the experiment No.2

3.3 実験2における窒素収支と実質脱窒量の算出

Table 5 Nitrogen balance in the experiment using a co-organic substrate for PVA degradation

Run No. TOC loading rate (g/m ² .d)		Input NH ₄ -N (%)	Output						
			NH ₄ ⁺ (%)	NO ₂ (%)	NO ₃ (%)	N in biomass (%)			Net denitrification (%)
						a*	b*	total	
5	1.0	100	0.0	14.3	45.8	9.5	19.1	28.6	11.3
7	2.0	100	1.2	28.2	9.2	9.5	19.1	28.6	32.8
6	4.2	100	16.4	0.5	0.1	8.6	19.1	27.7	55.3

a*: PVA- decomposing bacteria
b*: phenol -decomposing bacteria

本研究においては、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の除去を硝化、 T-N の除去を脱窒(菌体増殖に利用されたN量も含む)と定義している。微生物の増殖による窒素量を考慮するために、菌体分子式を $\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N}$ とし、PVAを基質とした増殖収率係数は $0.298 \text{ g-vss/g-PVA}^{23)}$ 、フェノールを基質とした増殖収率係数は $0.600 \text{ g-vss/g-フェノール}^{22)}$ と仮定し、菌体増殖による窒素の固定量と実質脱窒量を計算してその結果を表-5に示す。

全体的に菌体増殖に固定したNは約28.6%であり、その割合は難分解性物質であるPVAの場合が9.5%を占めフェノールより約2倍低かった。実質脱窒量においては、TOC負荷が $1 \text{ g/m}^2\cdot\text{d}$ の条件では11.3%、TOC負荷が $2.0 \text{ g/m}^2\cdot\text{d}$ の条件で32.80%、TOC負荷が $4.2 \text{ g/m}^2\cdot\text{d}$ の条件で55.3%とそれぞれ算出され、PVAとフェノールを脱窒の有機炭素源として脱窒が行われたことが確認された。

3.4 PVAを唯一の炭素源とした脱窒

図4に実験2で形成された生物膜を用いてPVAを唯一の有機炭素源とした脱窒の実験結果を示している。HRTの増加に伴ってPVA分解率、硝化及び脱窒率は共に増大し、PVA除去率および硝化率はHRT 10時間の条件でそれぞれ95%および98%に達したのに対して、脱窒率はHRT 8hrの条件で82%の最大値を示した。これらの結果はPVAを脱窒の唯一の有機炭素源として用いることが可能であること、また脱窒素のための最適HRTは8時間前後であることを示唆している。HRT 10hrの場合、脱窒率が減っていることはHRTが長すぎると、PVAが脱窒の有機炭素源になるよりも一部分は優先的に好氣的に酸化されることを意味する。実験期間中、反応槽のDO濃度は、HRT 2.2hrにおいては 1.8 mg/L 、HRT 40hrにおいては 4.2 mg/L であって、好気性条件が維持されたので、本実験の結果は好気性生物膜による脱窒素が可能であることを示している。

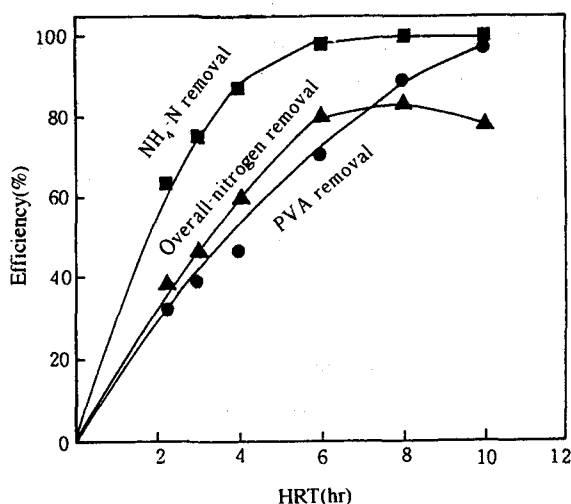


Fig.4 Effect of HRT on the efficiencies of PVA and nitrogen removal under aerobic condition in the experiment No.3 (Using PVA as a sole organic carbon source)

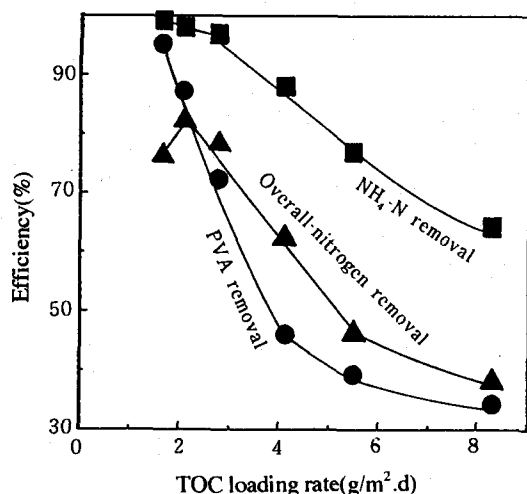


Fig.5 Effect of TOC loading rate on the efficiencies of PVA and nitrogen removal under aerobic condition in the experiment No.3 (Using PVA as a sole organic carbon source)

図5では実験3におけるPVAの除去率、硝化率および脱窒率に及ぼすTOCの影響を示す。TOC-負荷 $1.7 \text{ g/m}^2\cdot\text{d}$ の条件においては、PVA除去率、硝化率及び脱窒率はそれぞれ95%、98%及び97%を示しているが、TOC負荷の増加に伴ってPVA分解率、硝化及び脱窒率は共に減少し、TOC負荷 $8.3 \text{ g/m}^2\cdot\text{d}$ の条件ではPVA除去率、硝化率及び脱窒率はそれぞれ34%、64%及び39%を示した。これらの結果を図3のフェノールを共存基質として用いた結果と比較した場合、PVAの除去率は減少し、TOC負荷 $4 \text{ g/m}^2\cdot\text{d}$ 条

件ではPVAの除去が約2倍低かった。これらの結果は共存基質としてフェノールを用いることによってPVAの除去が促進されることを示唆する。

Table 6 Nitrogen balance in the experiment using PVA as a sole organic carbon source

Run No.	HRT (hr)	Input NH ₄ -N (%)	Output				
			NH ₄ ⁺ (%)	NO ₂ ⁻ (%)	NO ₃ ⁻ (%)	N in biomass (%)	Net denitrification (%)
8	2	100	36.4	22.6	2.1	9.0	29.9
8	3	100	24.1	26.8	2.7	8.4	38.0
8	4	100	13.0	23.9	2.9	6.8	53.4
8	6	100	1.5	15.2	4.9	4.4	74.0
8	8	100	0.0	12.4	6.1	3.7	77.8
8	10	100	0.0	11.4	12.0	3.2	73.4

表-6では実験3で求めた窒素収支のデータを示す。PVAを唯一の有機炭素源として用いた場合でもPVA分解、硝化・脱窒が行われ、PVAが脱窒の唯一の有機炭素源として用いることが可能であることを示している。

PVAを唯一の炭素源として用いた回分実験(実験条件; C/N比 4:1, MLSS濃度384mg/L、振蕩培養器の温度30℃、振蕩数120rpm)においても図-6より明らかにように、同じ反応瓶においてPVAの分解、NH₄⁺の酸化およびNO₃⁻の除去が同時に進行した。

3.5 生物膜の細菌群構造

(1) HRT40時間の場合(Run 5)

この条件では有機的負荷が低いため成長した生物膜が薄く、380-400μmしかなかった。また反応槽のDO濃度は4.1mg/lと比較的高かったのでこの条件においては酸素が生物膜の表面から支持体まで十分浸透でき、生物膜全体が好気的条件にあると考えられる。そのため、生物膜の分層解析を行わず一括して細菌数を計数した。表-7に生物膜全体の細菌群構成を示す。PVA分解菌、アンモニア酸化細菌、亜硝酸酸化細菌及び脱窒細菌はそれぞれ5.9 X 10⁷、1.97 X 10⁷、8.72 X 10⁷、2.73 X 10⁷MPN/mg・SSと計数された。この結果は同生物膜においてPVA分解細菌、硝化細菌及び脱窒細菌が十分混在していることを示しており、PVA分解、硝化及び脱窒の諸反応が同一生物膜で進行可能なことを裏付けている。

(2) HRT20時間の場合(Run 7)

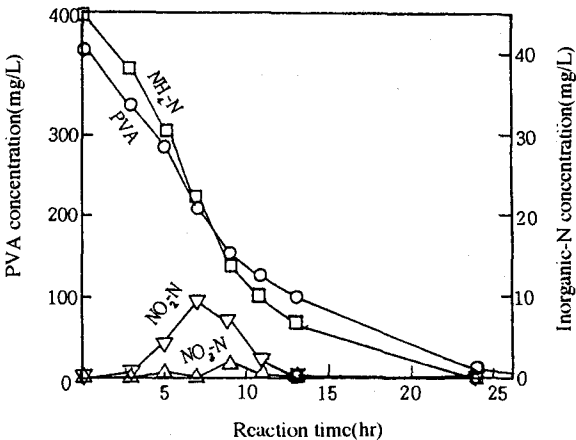


Fig.6 Removal of PVA and nitrogen in batch experiment using PVA as a sole organic carbon source under aerobic condition

この条件においては生物膜は2,200 μm (12番目の円板)まで厚く成長していた。この場合、生物膜の表層と底層のDO濃度がかかなり異なると考えられるため、同生物膜を三つの層に分け、細菌群の分布を測定し、各層ごとの平均の細菌数を示した。Run 7の運転期間を200日まで長く設定したのは十分定常状態に達した生物膜の細菌群構造を把握したいためであった。図7に示すように、PVA分解菌、硝化細菌および脱窒素細菌が生物膜の各層において共存しているが、中間層、底層に比較して基質および酸素が十分浸透できる表層においてPVA分解菌と脱窒素細菌は1ないし2オーダーほど多く計数された。また底層においてもPVA分解菌と硝化細菌がそれぞれ 10^6 以上存在していた。

(3) HRT10時間の場合 (Run 6)

Run6ではRun5の実験後HRTを10hrに変えてから120日経過した時の生物膜の細菌構造の解析を行った。水理学的負荷が高い条件において生物膜が厚く成長し、1枚目と2枚目の円板では2,800-3,000 μm まで達した。1枚目、6枚目、10枚目の円板に成長した生物膜を分層切断し、それぞれの細菌群構成を解析した。図8に示すように、PVA分解細菌及び $\text{NO}_2\text{-N}$ 酸化細菌は1枚目の円板の生物膜に一番多く存在したのに対して、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 酸化細菌は10枚目の円板の方が多かった。脱窒素細菌はPVA分解細菌が一番多く存在する表層部において多く計数された。

Table 7 Bacterial composition of biofilm in the experiment Run 5

Constituents	Bacteria numbers (MPN/mg.SS)
PVA-decomposing bacteria	5.98×10^7
Nitrate reducing bacteria	3.99×10^6
Denitrifiers	2.73×10^7
Ammonium oxidizing bacteria	1.97×10^7
Nitrite oxidizing bacteria	8.72×10^7

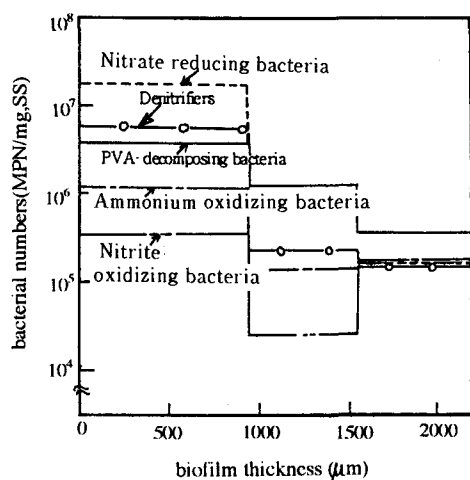


Fig.7 Profiles of intrinsic bacterial populations in aerobic biofilms in Run 7 (Disk No.1)

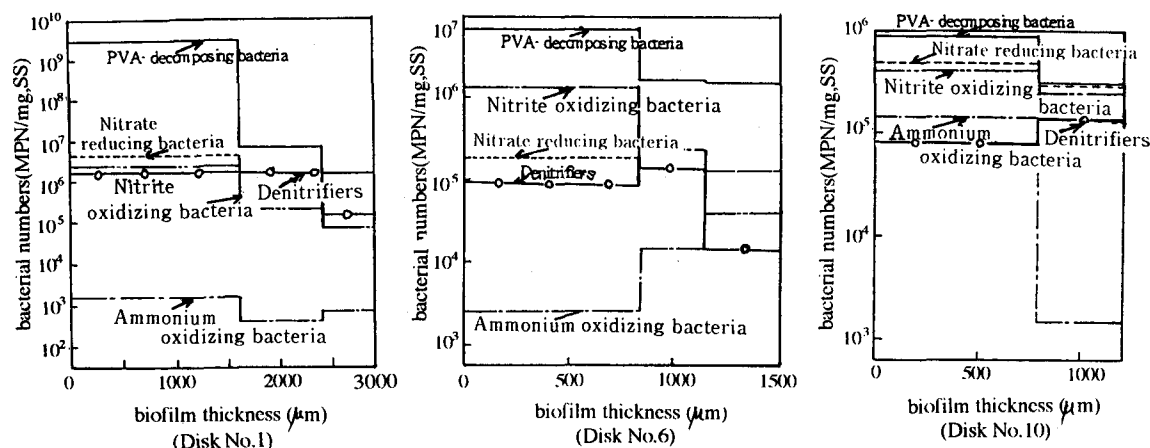


Fig.8 Profiles of intrinsic bacterial populations in aerobic biofilms in Run 6

3.6 好気性生物膜における脱窒現象の考察

本研究では好気性生物膜においてのみPVAを用いた高効率の脱窒が見られた。その機構としては次の三つが考えられる。

(1) 生物膜の表層部が好気性状態にあった場合においても拡散によって浸透したDOが好気性細菌により消費尽くされることにより、ある領域は嫌気性状態となることが考えられる。脱窒素反応はこの嫌気性領域において進行する可能性がある。

Suzuki¹⁰⁾、酒井¹⁵⁾はPVA分解経路は図9のように推定している。本研究で、無酸素の条件で高分子そのまのPVAは脱窒の有機源として使われなかったが、好気性条件でPVAが脱窒の有機源として使われた理由は、図9の分解経路から考えると、高分子のPVAがPVA分解酵素によって酸化され過程で生成した中間物質が有機源となり脱窒が進行されることが推定される。

(2) ある程度DOが存在する領域においても脱窒機能を持った脱窒細菌の存在が考えられる。これらの脱窒細菌は(1)のPVA分解経路で生成された中間物質を有機炭素源として利用する可能性がある。

(3) 生物膜の表層部においてPVA分解細菌と脱窒細菌は共に高い菌数が計数され、脱窒細菌が生物膜の好気性層において多く増殖していることから、これらの好気性PVA分解細菌はPVA分解能及び好気性条件での脱窒機能も同時に兼有する可能性も考えられる¹⁶⁾。

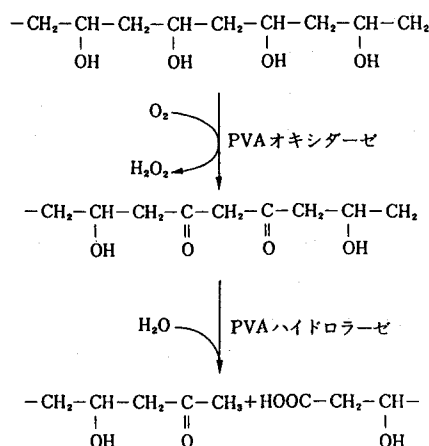


Fig.9 Aerobic degradation on pathway of PVA

4. 結論

好気性回転生物膜による生物学的難分解性物質であるPVA及び窒素の同時除去について実験的に検討した結果、次の結果が得られた。

(1) 無酸素条件ではPVAは全く分解されなかったのに対して、フェノールを共存させた好気性条件ではPVAがほぼ完全に分解された。

(2) PVA、フェノール及び $\text{NH}_4\text{-N}$ を含む廃水を好気性条件で処理した結果、脱窒率がTOC負荷の増加と共に増大し、 $1\text{g/m}^2 \cdot \text{d}$ 、 $2.1\text{g/m}^2 \cdot \text{d}$ 及び $4.2\text{g/m}^2 \cdot \text{d}$ の条件での脱窒素率はそれぞれ38%、60%及び84%であった。

(3) PVAを唯一の有機炭素源として好気性RBCによる $\text{NH}_4\text{-N}$ 含有廃水の硝化、脱窒素について実験した結果、PVA分解率及び硝化率はHRTの増加に伴って増大し、HRT10hrの条件でそれぞれ95%及び99%に達したのに対して、脱窒効率はHRT8hrの条件で最大値の82%に達した。この結果はPVAを脱窒の唯一の有機炭素源として用いることが可能であること、また脱窒素のための最適HRTは8時間前後であることを示唆している。

(4) PVA分解菌、硝化細菌および脱窒素細菌が生物膜の各層において共存しているが、生物膜が厚く成長した場合、中間層、底層に比較して基質および酸素が十分浸透できる表層においてPVA分解菌と脱窒素細菌は1ないし2オーダーほど多く計数された。

参考文献

- 1) 中西 弘: 上下水の酸化処理に関する2, 3の研究、京都大学学位論文、pp. 60, 1966
- 2) 左合正雄、山口博子: 工場廃水に含まれる有機薬品の生物酸化の可能性、下水道協会誌、Vol. 2, pp.

2033,1965

- 3)橋本 奨: 活性汚泥法による難分解性物質の処理に関する研究(第3報)、下水道協会誌、Vol 17、, pp.17-25、1980
- 4)Young-Kyu Park, Chul-Hee Lee, Du-Yeon Bang,: Polyvinyl alcohol removal and some properties associated with its degradation by rotating biological contactor, proc. of 3rd IAWPRC regional conference ASIAN waterqual on development and water pollution control, 1991
- 5)M.Werner and R.Kayser: Denitrification with biogas as external carbon source, Wat. Sci. Tech., Vol.23(Kyoto), pp. 701-708, 1991
- 6)Davies, T.R.: Isolation of bacteria capable of utilizing methane as a hydrogen donor in the process of denitrification, Water Research, Vol. 7, pp. 575-579, 1973
- 7)Harish Pesari and Domenic Grasso : Biodegradation of an Inhibitory Nongrowth Substrate (Nitroglycerin)in-Batch Reactors, Biotech. and bioeng.,VOL.41, pp.79-87, 1993
- 8)Finley, J. H.: Spectrophotometric determination of Polyvinyl Alcohol in paper coatings, Analyt. Chem., Vol. 33, pp. 1925-1927, 1961
- 9)土壤微生物実験法: 土壤微生物研究会編、養賢堂発行、1975
- 10)橋本 奨: ポリビニールアルコール分解菌の分離とその性質、下水道協会誌、Vol .23 ,pp.44-50、1986
- 11)Sakazawa,C., Simao,M.,Tankguchi, Y., Kato,N.: Symbiotic utilization of Polyvinyl Alcohol by mixed cultures, Appl. Environment Microbiol., Vol. 41, pp. 261-267, 1981
- 12)渡辺: 合成高分子化合物の酵素分解、化学と生物、Vol .19、 pp.605-610、1981
- 13)中村宮地: Phenol Hydroxylase 遺伝子を導入した組み換え微生物によるトリクロロエチレンの分解、環境工学研究論文集、Vol.29, pp. 17-25,1992
- 14)Suzuki,T., Ichihara, Y., Yamada,M., Tonomura, N.: Some characteristics of Pseudomonas O-3 which utilizes Polyvinyl Alcohol, Agr. Biol. Chem., Vol. 37, pp.747-756, 1973
- 15) 酒井: 京都大学学位論文、1986
- 16)L.A. Robertson and J. G.Kuenen,: Aerobic denitrification: a controversy revived, Arch. of Microbiol., Vol.139, pp.351-354, 1984
- 17)Sakazawa, C., Simao,M., Tankguchi, Y., Kato,N.: Pyrroloquinoline quinone dependent cytochrome reduction in Polyvinyl Alcohol-degrading Pseudomonas sp. strain VM15C, Appl.,Environ. Microbiol., Vol.55, pp. 275-278, 1988
- 18)山田 登志夫、宗宮 功、津野 洋: 好気性脱窒能を有する細菌の検索とその生理特性に関する研究、Vol.30 , pp.118-129, 1993
- 19)Y. Watanabe, D.Y. Bang, K.Itoh, and K. Matsui,: Nitrogen removal from wastewaters by a bio- reactor with partially and fully submerged rotating biofilms, proc. of the 2nd international conference on biofilm reactors(in Paris), 1993
- 20)増田純雄、渡辺義公、石黒政義: 円板付着生物膜内細菌に関する研究、下水道協会誌Vol24、1987
- 21)橋本 奨: 活性汚泥によるフェノール廃水処理の効率化に関する研究(I)、下水道協会誌、Vol .23 ,pp.39-46、1986
- 22)V.Pawlowsky and J. A. Howelc.: Mixed culture biooxidation of phenol I determination of kinetic parameters, Biotechnology and bioengineering, Vol. XV, pp. 889-896, 1973
- 23)橋本 奨: 活性汚泥による難分解性物質の処理に関する研究(5)、下水道協会誌、Vol .17 ,No.198,pp.19-29、1980