

(22) メタン発酵菌及び脱窒菌固着微生物による有機物・硝酸性窒素
同時除去に関する基礎的研究

A STUDY ON SIMULTANEOUS TREATMENT OF ORGANIC
MATTER AND NITRATE WITH A BIOFILM CONSISTING OF
METHANE FERMENTATIVE BACTERIA AND DENITRIFYING
BACTERIA

黒田 正和*, 島 秀有*, 榊原 豊*

Masao KURODA*, Hidetomo SHIMA*, Yutaka SAKAKIBARA*

ABSTRACT; Methane fermentative bacteria and denitrifying bacteria were enriched with a synthetic medium, and a biofilm was formed on solid support surfaces in a completely mixed reactor. In the medium, glucose, peptone and sodium nitrate were used as carbon and nitrogen sources.

By using the biofilm reactor, characteristics of the anaerobic treatment of an aqueous mixture of organic matter and nitrate were studied experimentally, and effects of the C/N ratio on removal efficiencies of TOC and nitrate and effluent characteristics were examined in batch wise and/or continuous operations.

Organic matter and nitrate were removed simultaneously in the anaerobic biofilm reactor, in which methane fermentative bacteria and denitrifying bacteria symbiosed. In the simultaneous treatment, acetate which is an intermediate metabolic product in methane fermentation were effectively utilized by denitrifying bacteria as hydrogen donor. Competition between methanogens and denitrifying bacteria existed for the utilization of acetate. Removal efficiencies of TOC and nitrogen for continuous operations were greater than 94% and 65%, respectively. Both the values of ORP and pH increased with the increment of nitrate concentration. Under high nitrate loading conditions, methane gas production decreased.

KEYWORDS; methane fermentation, denitrification, symbiosis, acetate, anaerobic biofilm reactor.

1. 緒 言

嫌気性生物膜による下廃水処理は、種々の優れた特徴はあるものの、高速かつ高効率処理を行うには、好気性生物膜処理との組合せ処理が適切と考えられる。嫌気性生物膜槽と好気性生物膜槽との組合せ処理プロセスでは、原水中の有機物の大部分は、嫌気性生物膜槽（第1槽）で有機物を経てメタン、二酸化炭素へ分解され、続いて好気性生物膜槽（第2槽）で残存有機物が分解されると共に NH_4^+ は NO_2^- 、 NO_3^- へ酸化される。¹⁾²⁾したがって、原水中の有機物濃度が高い場合も、有機物負荷は両槽に分散され、高速かつ高効率処理が可能である。このような嫌気・好気組合せ処理プロセスにおける高度の窒素除去は、現在の脱窒プロセスと組合せることで可能であるが、全体のプロセスは複雑となる。嫌気性生物膜槽に脱窒菌を共生させ、好気性生物膜槽溢流水の一部を嫌気性生物膜槽へ再循環させることで脱窒素できれば、プロセスは簡単となり有用である。

* 群馬大学工学部建設工学科 (Dept. of Civil Eng. Gunma University)

酸生成菌、メタン生成菌、脱窒菌等を共生させた嫌気性生物膜では、脱窒菌による NO_2^- 及び NO_3^- の還元に必要な水素供与体として、メタン発酵中間生成物で、資化性の高い酢酸を利用でき、有機物と共に NO_2^- 及び NO_3^- の除去が期待できる。

メタン発酵は酸生成菌、acetogenic菌、メタン生成菌の連携によるものであり、これら微生物がそれぞれ十分機能しない場合、安定な操作は困難である。特にメタン生成菌は偏嫌気性で、その活性はpH、ORP など化学的環境条件に影響されやすいため、脱窒菌を共生させる場合、脱窒反応による化学的環境条件の影響を検討することは重要である。したがって、本研究は、上記嫌気・好気プロセスに関し、メタン発酵と NO_3^- 除去が同時的に可能な処理法の基礎的研究として、固着メタン生成菌の活性に及ぼす NO_3^- 濃度の影響について検討を行った。また、メタン生成菌(methanosarcina、methanothrix)は、酢酸利用に関して脱窒菌と競争の関係にあると考えられることにより、これら微生物を共生させた生物膜における、酢酸を水素供与体として利用した NO_3^- 除去の可能性とメタン発生量の変化についても検討を行った。

2. 実験装置および方法

(A) 実験装置

Fig. 1 に実験装置の概略を示した。処理槽は既報の④メタン菌固着生物膜実験に用いたものと同じ完全混合型の嫌気性充填ろ床を2槽用意した。液容積は2.7ℓで、充填基材(生物膜支持材)は突起部を有する塩ビ樹脂(比表面積 0.792 1/cm)を用いた。連続実験では基質及び無機塩溶液は、マイクロチューブポンプにより連続的に供給した。なお、両液は処理槽直前で混合させた。槽内処理水はリサイクルポンプにより5～7ℓ/minで循環させた。処理槽は $37 \pm 1^\circ\text{C}$ の恒温槽に浸漬し、発生ガスは飽和食塩水を封液としたガスホルダーで捕集計量した。

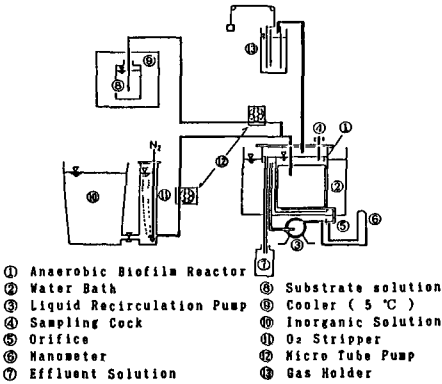


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

(B) 実験方法

実験はメタン発酵に係わる酸生成菌、acetogenic菌、メタン生成菌(以下メタン発酵菌という)及び脱窒菌を混合培養し、そのスラリーより形成させた生物膜処理槽1とメタン発酵菌のみを固着させた生物膜処理槽2を使用した。

1) メタン発酵菌・脱窒菌固着生物膜の形成

K市衛生センターの脱窒槽より採取した脱窒菌と、当研究室において、グルコースとペプトンを炭素源とした合成下水により馴養したメタン発酵菌を混合し種汚泥とした。この種汚泥にグルコース及び硝酸ナトリウムをC/N比4～8で投入し、メタン及び窒素ガスの発生を確認した後、基材を浸漬し、約6カ月間グルコース、ペプトン(それぞれ500mg-C/ℓ)及び硝酸ナトリウム(50mg-N/ℓ)にTable 1に示した無機塩を添加した合成下水を連続的に供給して馴致し、生物膜を形成させた。また、供給合成下水の水理学的滞留時間(HRT)は24時間とした。

2) メタン発酵菌固着生物膜の形成

A市下水処理場より採取した嫌気性消化汚泥を種汚泥とし、グルコース及びペプトンに、Table 1に示した無機塩を添加した合成下水で約3年間馴養されている嫌気性生物膜を使用した。なお、馴養期間の流入T_{OC}濃度は約1000mg-C/ℓでHRTは24時間とした。

Table 1 Composition of inorganic solution

(NH ₄) ₂ CO ₃	343 mg/l
K ₂ HPO ₄	11
KH ₂ PO ₄	13
NaCl	6
MgSO ₄ · 7H ₂ O	25
CaCl ₂	7
FeCl ₂ · 6H ₂ O	12

処理槽 1 及び 2 について、メタン及び窒素ガスの発生速度、処理水の酸及び NO_3^- -N 濃度が十分定常状態となっていることを確認した後、回分実験、連続実験を開始した。なお、連続実験における供給合成下水の HRT は 24 時間で行い、pH、ORP (酸化還元電位、 $\text{Ag} | \text{AgCl} | \text{KCl} (3.3 \text{ M})$ Electrode) の制御は行わなかった。

(C) 分析方法

発生ガス組成は TCD ガスクロマトグラフィで測定した。溶解性有機炭素 (TOC)、無機炭素 (IC)、全窒素 (TN)、及び形態別窒素は TN・TC 分析計及び形態別窒素分析計で分析測定した。揮発性有機酸濃度は、FID ガスクロマトグラフィで測定した。グルコース濃度は Somogyi-Nelson 法により測定した。なお、サンプリング液は、ガラスフィルター (GC50) により濾過し供試料とした。

3. 実験結果及び考察

(A) メタン発酵菌、脱窒菌共生処理槽における回分実験による有機物・硝酸性窒素同時除去特性

炭素源としてグルコース、窒素源として硝酸ナトリウムを添加し、回分式操作で処理した結果の一例を Fig. 2 に示した。Fig. 2 において、C/N 比 (Organic-C/ NaNO_3 -N) は 5 である。図からわかるように、グルコースは NO_3^- -N より早く反応初期のうちに消失した。 NO_3^- -N 濃度は直線的に減少し、減少速度は約 $30 \text{ mg-C/l} \cdot \text{hr}$ で、グルコースの減少速度 ($340 \text{ mg-C/l} \cdot \text{hr}$) より小さかった。ガスの発生は、ガス発生速度の速い期間 (第一段階) とガス発生速度の遅い期間 (第二段階) の 2 期間に分けられた。グルコース及び NO_3^- -N は第一段階で消失した。発生ガスの組成は、第一段階では N_2 、 CH_4 、 CO_2 が発生し (2 時間後でそれぞれ 35、50、15%)、 NO_3^- -N 消失後の第二段階ではおもに CH_4 、 CO_2 が発生した。このことから、メタン生成反応と窒素ガス生成反応は同時的に進行していることが考えられる。TOC 濃度は反応初期に急激に減少した。これは酸生成菌によるグルコースの分解に加えて、脱窒菌により利用された部分もあると考えられる。また、 NO_3^- -N 消失後、

TOC はゆるやかな減少を示した。これは、ガスおよび液組成からメタン発酵による TOC の減少と考えられる。有機酸濃度は、ほぼグルコース消失時にピークがあり、グルコースが有機酸に速やかに分解されていることを示している。有機酸の最大蓄積濃度は酢酸、プロピオン酸、酪酸の順に大きく、濃度の割合は 4 : 3 : 1 であった。pH、ORP は初期に大きく上昇し、ピークを示した。このような pH、ORP の変化はメタン発酵のみでは見られなく脱窒に伴うアルカリ度の増加によるものと考えられる。

グルコースを基質としたとき、メタン発酵は、酸生成過程とメタン生成過程に大別できるが、脱窒反応において、グルコースが水素供与体として直接利用されていることも考えられ、Fig. 2 の結果は必ずしも酢酸のみが水素供与体として利用されているかどうかは明確ではない。そこで、メタン生成過程と脱窒過程が同

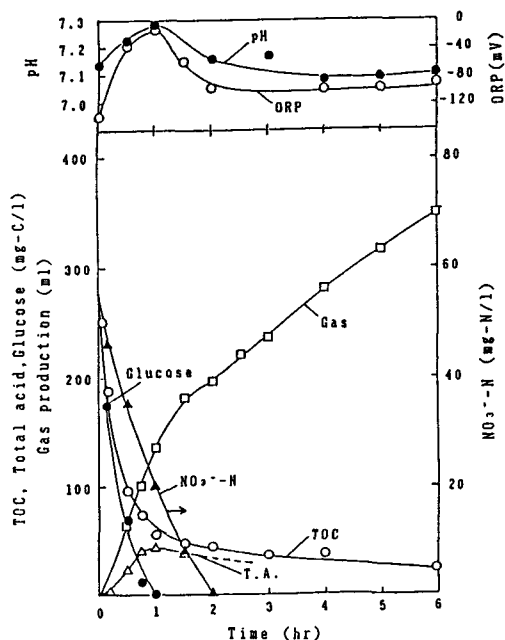


Fig.2 Simultaneous decomposition of glucose and nitrate (batch wise operation)

時的に進行し、両過程における酢酸利用速度の関係を明らかにするため、初期酢酸濃度は $300\text{mg-C}/\ell$ で一定とし、C/N比を種々変化させ、ガス発生速度、 NO_3^- -N減少、酢酸減少速度について検討を行った。各々の結果をFigs. 3、4、5に示した。Figs. 3、5において、C/N = ∞ は、 NO_3^- -Nを添加せず、酢酸のみを投入した結果を示す。Fig. 3よりわかるように、ガス発生速度はグルコースを基質とした場合と同様に二段階で変化した。即ち、 NO_3^- -Nの消失前と後ではガス発生速度は異なり、 NO_3^- -N減少過程のガス発生速度（第一段階）は、 NO_3^- -Nの消失後のガス発生速度（第二段階）より速い。例えば、C/N=4の条件では第一段階において、 N_2 発生速度は約 50ml/hr 、 CH_4 発生速度は約 49ml/hr であった。第二段階では CH_4 発生速度は約 54ml/hr で N_2 の発生はほとんどみられなかった。したがって、第一段階におけるガス発生速度が大きいの脱窒とメタン生成の両反応が起こっていることによると考えられる。第二段階のガス発生速度はC/N = ∞ の場合が他のC/N比の場合と比べて大きかったが、これは主として、発酵液pHが他に比べやや低く、 CO_2 発生量も増加したことによるものと考えられる。各実験条件ともに CH_4 発生速度は $51\sim 54\text{ml/hr}$ ではほぼ等しかった。 NO_3^- -N分解速度は、Fig. 4に示すように、C/N比の低下につれ（ NO_3^- -N濃度の増加につれ）増加する傾向がみられた。しかしながら、 NO_3^- -N分解速度は硝酸濃度に対し零

次近似される場合が多い³⁾ことより、硝酸濃度の影響については今後さらに詳細な検討が必要である。Fig. 5からわかるように、C/N = ∞ （メタン発酵のみ）の場合の酢酸減少速度に比べ、C/N比を5、4として脱窒反応が並行した時の方が、初期の酢酸減少速度が大きかった。Fig. 5において NO_3^- -Nが消失する略2時間後はメタン発酵のみの時と同様な酢酸減少速度を示した。C/N比5を例にとると、反応初期において、メタン発酵による酢酸減少速度は $20\text{mg-C}/\ell\cdot\text{hr}$ 、消費された NO_3^- -Nの還元に必要な酢酸量（ $1.07\text{mg-C}/\text{mg-N}$ ）⁵⁾から求めた酢酸

減少速度は $45\text{mg-C}/\ell\cdot\text{hr}$ であるのに対し、測定された酢酸減少速度は $75\text{mg-C}/\ell\cdot\text{hr}$ であった。グルコースによるメタン発酵と脱窒の同時処理では、グルコースが脱窒反応の水素供与体として利用されていることも考えられ、必ずしもメタン発酵中間体である酢酸のみが利用されているとは言えない。しかし、Figs. 3、4、5の結果よりメタン生成菌と脱窒菌は、酢酸に対し競争の利用関係にあり、この処理槽内のメタン生成菌と

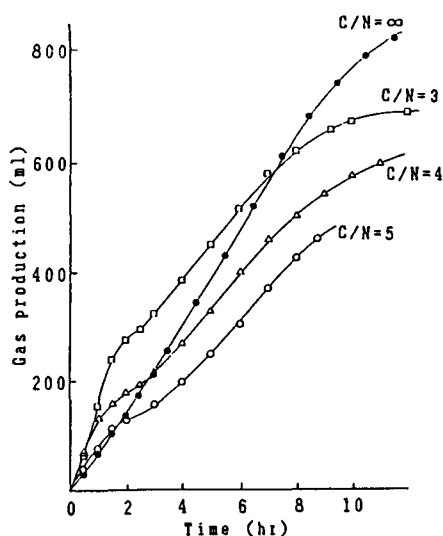


Fig. 3 Variations of gas production with the ratio of C and N

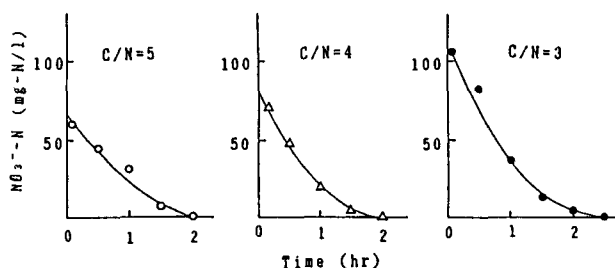


Fig. 4 Depletion of NO_3^- -N concentration

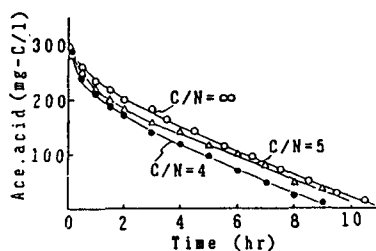


Fig. 5 Depletion of acetic acid concentration

脱窒菌の共生状態では、脱窒菌による酢酸利用速度はメタン生成菌による酢酸利用速度にはほぼ等しいかむしろ速いとも考えられる。

NO₃⁻ の還元によるN₂の生成は、次に示す逐次反応で進行する。



このように還元反応が進行するとき、水素供与体が必要とする。そこで、メタン発酵と脱窒反応が並行して起こるとき、脱窒菌による水素供与体の利用とメタン発酵について次の4つの場合が考えられる。

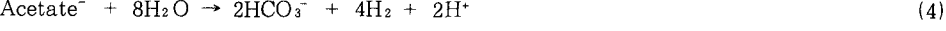
① H₂ について、メタン生成菌 (H₂ 利用菌) と脱窒菌による競争的利用

この系では、メタンは次式のように生成される。



② 酢酸について、メタン生成菌 (酢酸利用菌) と脱窒菌による競争的利用

メタン発酵過程で生成された酢酸の同時的利用



③ グルコースについて、酸生成菌と脱窒菌による競争的利用



④ メタン生成と生成メタンの利用



このような反応の中で、グルコースを炭素源としてメタン発酵を行う場合、グルコースの減少速度はNO₃⁻-N 分解速度より充分大きく、グルコース消失後もNO₃⁻-N分解速度の低下がみられないこと、また、酢酸を炭素源とした場合、脱窒は速やかに進行し、N₂の発生と合わせてCH₄の発生も認められたことから、脱窒菌による酢酸の利用は高く、反応は主として②で進行し、酢酸利用についてメタン生成菌と脱窒菌は競争的關係にあるものと考えられる。

(B) 連続操作による有機物・

硝酸性窒素同時除去

グルコースとペプトンを炭素源として、Table 2 に示した実験条件のもとで連続操作により有機物、硝酸性窒素同時除去した場合のガス発生、処理水のTOC、IC、TNの経時変化をFig. 6 に示した。図から、Run 1のガス発生速度は若干変化しているものの他のRunのN₂発生速度、CH₄発生速度ならびに処理水TN、TOC濃度は比較的安定しており、微生物を支持材表面に固着させることによって安定した有機物除去及び硝酸除去が行われて

Table 2 Experimental conditions

Run	Glucose (mg/l)	Pepton (mg/l)	(NaNO ₃) ₁ (mg-N/l)	C:N (ratio)
①	500	500	0	-
②	500	500	50	20
③	500	500	100	10
④	500	500	250	4
⑤	500	500	500	2

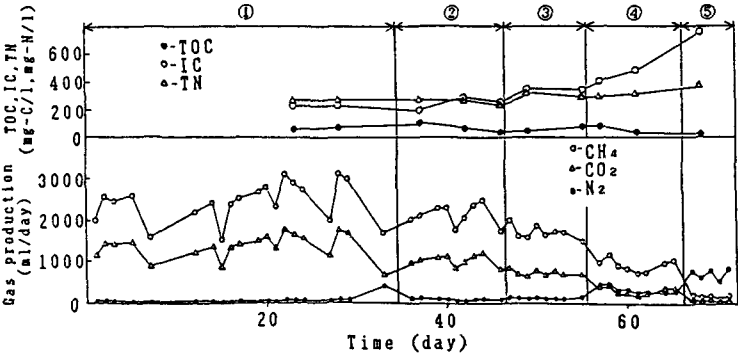


Fig.6 Simultaneous decomposition of organics and nitrate (continuous operation)

Table 3 Experimental results (glucose and nitrate decomposition)

C:N ratio	Conversion CH ₄ (%)	N ₂ yield (%)	TOC removal (%)	Ace acid/TOC (%)	pH
-	48	-	94	56	6.8
20	43	89	97	38	7.1
10	31	67	94	39	7.2
4	19	65	95	41	7.4
2	4	65	99	30	7.8

いることがわかる。Fig. 7には、CH₄、N₂発生速度に対するNO₃⁻-N濃度の影響を示した。Figs. 6、7からわかるように、CH₄、CO₂発生速度はC/N比の減少につれ減少し、一方、N₂発生速度は増加した。CH₄発生速度はC/N比2ではNO₃⁻-Nを添加しない場合のCH₄発生速度のほぼ8%にまで減少した。処理水中のTOC、TNは実験条件が異なってもほぼ変化がないが、ICはNO₃⁻-N濃度の上昇につれ明らかに増加傾向を示した。pH、ORPは共にC/N比の減少に伴って上昇し、C/N比2ではpHは7.8まで上昇した。Table3に処理結果をまとめて示した。表中のCH₄、N₂転化率は、流入TOC、NO₃⁻-N量に対するCH₄-C、N₂量から算出したものである。TOC除去率はC/N比によらず94%以上で、有機物、硝酸性窒素同時除去においても有機物除去率は低下しなかった。NO₃⁻-Nの除去率(NO₃⁻-NのN₂への還元率)は65%(C/N=2)以上であり、流入NO₃⁻-NのN₂への転化による窒素除去は行われている。しかし、処理水TN濃度はC/N比による変化がみられず、流入水中のNH₄⁺-N(100mg-N/l)およびペプトンの分解に伴って生じるNH₄⁺-Nの除去は行われていないと考えられ、さらに検討を必要とする。また、C/N比の減少に伴うpHの上昇もメタン発酵菌の活性に至適の範囲に、制御することが必要となることもあると思われる。

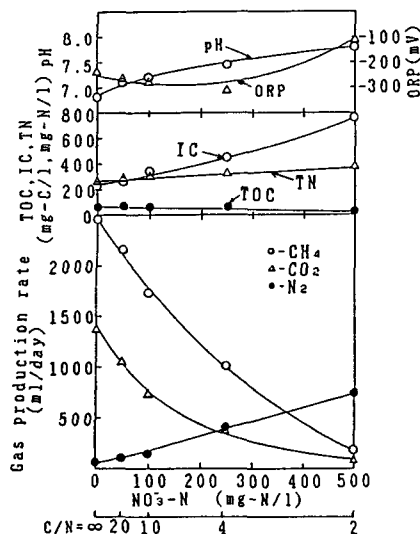


Fig.7 Effect of the ratio of C and N on gas production rates and concentration of TOC, IC and TN

(C) メタン発酵におけるNO₃⁻の影響

メタン発酵菌のみにより形成された生物膜を充填した処理槽2において、NO₃⁻-Nを種々の濃度で添加した場合の処理水TOC、TN、IC及びガス発生速度の経時変化をFig.8に示した。Table 4には実験条件を示した。なお、この実験ではNH₄⁺-Nは添加しなかった。pH、ORPは特に制御しなかったが、実験期間を通じてそれぞれ6.5～

7.1、-130～-190mVであった。Fig.9は、ガス発生速度及び処理水TOC、TN、ICに対するNO₃⁻-N濃度の影響を示した。図からわかるように、流入NO₃⁻-N濃度の増加につれ、メタン発生量は減

Table 4 Experimental conditions

RND.	Glucose (mg-C/l)	NaNO ₃ (mg-N/l)	C:N ratio
①	500	50	10
②	500	100	5
③	500	150	3.3
④	500	200	2.5

Table 5 Experimental results of methane fermentation

C:N ratio	Conversion CH ₄ (%)	TOC removal (%)	Ace acid/TOC (%)
-	50	-	74
10	35	93	68
5	25	96	70
3.3	14	97	53

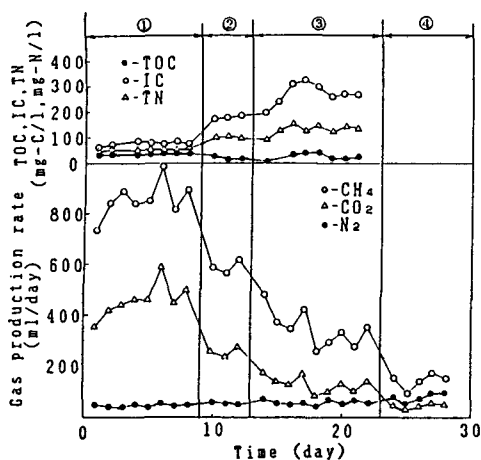


Fig. 8 Effects of nitrate concentration on methane fermentation

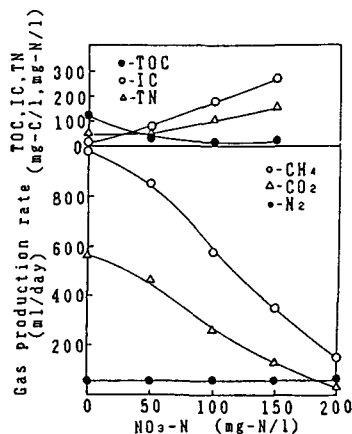
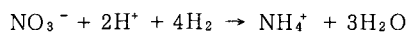


Fig. 9 Variations of gas production rates with nitrate concentration

少するが、I Cは増加した。また、流出T N濃度は流入T N濃度にほぼ等しかった。処理水T Nの組成は、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (Run 3で約112mg-N/l)が多く $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ は数ppm以下であった。なお、各Runで N_2 が測定されたが、流入 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 濃度によらずその発生量はほぼ一定していることから、流入水中に溶存した N_2 のストリップ効果によると考えられる。Table 5に処理結果をまとめて示した。TOC除去率はC/N比によらず93%以上であった。しかし、流入 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 濃度の増加につれ、酢酸濃度は減少し、 CH_4 転化率も減少した。そこで、 NO_3^- から NH_4^+ への転化を考えると、次式⁹⁾のような反応が考えられる。Eq.(7)のGibbs エネルギー変化 ΔG_r^0 (pH=7)は負であり、このような反応が起こっていると仮定すると、Eq.(4)のように水素供与体として有機物が利用され、 CH_4 の発生が減少すると共に HCO_3^- の増加に伴うICの増加が考えられる。ここで、Table 5の各実験条件について、次式に従って NH_4^+ 生成の水素消費によるメタン転化率の減少量を計算するとC/N=10、5、3.3の場合、それぞれ9、17、34%となり、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ を用いた場合のメタン転化率50%からの減少量とほぼ一致する。



$$\Delta G_r^0 = -143 \text{ kcal/reaction}$$

(7)

(D) メタン発酵菌・脱窒菌共生処理槽における硫酸イオンの影響

メタン発酵菌と脱窒菌を固着させた生物膜を充填した処理槽1において、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ は添加せず硫酸マグネシウムを種々の濃度で添加した連続実験を行った。そのときのガス発生速度及び処理水TOC、IC、TNに対する硫酸イオンの影響をFig. 10に示した。実験条件はTable 6に示した。Fig.

Table 6 Experimental conditions

Run	Glucose (mg-C/l)	Pepton (mg-N/l)	($\text{H}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) (mg-S/l)
①	500	500	0, 0
②	500	500	0.39, 50
③	500	500	0.77, 100
④	500	500	1.93, 250

10からわかるように、 SO_4^{2-} 濃度の増加に伴い CH_4 及び CO_2 発生速度は減少した。TOC濃度は SO_4^{2-} 濃度がほぼ100mg-S/lまでは顕著な変化はないが、 SO_4^{2-} 濃度が250mg-S/lでは SO_4^{2-} を加えない場合のほぼ2倍のTOC (120mg-C/l)が残留した。IC、TN濃度は SO_4^{2-} 濃度によらずほぼ一定であった。 SO_4^{2-} は、メタン生成反応に阻害を及ぼし(CH_4 発生速度の減少)、 SO_4^{2-} 濃度がほぼ100mg-S/l以上になるとメタン発酵に及ぼす阻害が顕著となると思われる。

(E) NO_3^- の還元に必要な酢酸当量

処理槽 1 において、酢酸を炭素源とし、硝酸ナトリウムを窒素源とした回分実験の結果をもとにして、単位 NO_3^- -N を還元するために、水素供与体として必要な有機物量(酢酸量)を算出した。脱窒に使用された酢酸量は、脱窒が終了するまで (NO_3^- -N が消失するまで)の全酢酸消費量から、発生ガス (CH_4 -C と CO_2 -C) 炭素量を引いた炭素量を正味の脱窒に使用された炭素量とすると単位 NO_3^- -N の還元に必要な酢酸量は 1.53 ~ 1.79 ($\text{mg-Ace-C}/\text{mg-NO}_3^-$ -N) と求められた。Eq.(4)のように酢酸が脱窒の水素供与体を利用される場合の理論的当量は 1.07 である。

4. 結 言

メタン発酵と脱窒を一つの処理槽内で同時的に行うことを目的とし、メタン発酵菌と脱窒菌を混合培養し、生物膜を形成させ、合成下水を供給し、処理の特徴、有機物・硝酸性窒素同時除去に及ぼす操作的条件の影響について回分実験および連続実験により、実験的検討を行い以下の結論を得た。

- (1) メタン発酵菌と脱窒菌の共生による有機物・硝酸性窒素同時除去は可能である。有機物除去は、流入 TOC に対して 94% 以上の除去率が得られ、硝酸性窒素除去は C/N 比 2 以上では流入 NO_3^- -N の 65% 以上の N_2 除去率が得られた。
- (2) 本処理法による有機物・硝酸性窒素同時除去において、メタン発酵プロセスの中間生成物(酢酸など)が脱窒の水素供与体として利用され、メタン生成菌と脱窒菌は酢酸利用について競争的關係にあると考えられた。
- (3) 高 NO_3^- 濃度域では ORP が上昇し、また、C/N 比を小さく脱窒を行わせると pH も上昇し、メタン生成菌の活性は低下する傾向がある。

謝辞：本研究の一部は文部省科学研究費(一般研究 C)の補助により行われた。また、本実験の遂行に諸岡正如氏(キンケン K. K)の御協力をいただいた。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 黒田正和、湯沢 恩、榊原 豊；嫌気(メタン発酵)好気 2 槽式処理槽による廃水処理、第 20 回下水道研究発表会講演集、6-44, pp. 308-310 (1983)
- 2) 黒田正和、湯沢 恩、榊原 豊、高野栄一；嫌気(メタン固着菌)生物膜槽と回転盤型好気性生物膜処理槽とを組み合わせた 2 槽生物膜方式による下水処理(温度の影響)、土木学会第 39 回年次学術講演概要集、II-412, pp. 823-824 (1984)
- 3) 河野哲朗；下水処理の原理と汚泥の処理処分、下水道ハンドブック、下水道産業調査会 pp. 556-559 (1982)
- 4) 榊原 豊、湯沢 恩、黒田正和；メタン菌固着生物膜の酢酸除去速度に及ぼす温度の影響、衛生工学研究論文集 Vol. 23, pp. 219-221 (1987)
- 5) 井出哲夫編；水処理工学、技報堂 (1976)
- 6) Thauer, R. K. et al.; Energy conservation in chemotrophic anaerobic bacteriol, rev, Vol. 41, pp. 100-180 (1977)

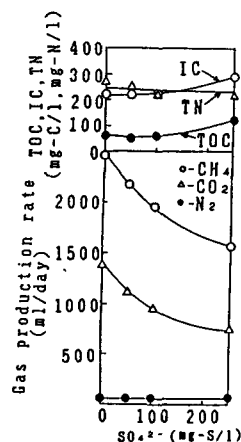


Fig.10 Variation of gas production rates and effluent water quality with sulfate concentration