論文要旨

水銀による嫌気性消化の阻害について II. 硫酸還元反応の役割および各種メタン生成反応の水銀感受性

石川 徳春* 松本順一郎*

* 東北大学工学部土木工学科

〈水質汚濁研究 Vol.9 No.8 (1986) pp.499~505〉

嫌気性消化プロセスに対する水銀の阻害作用について、回分実験により検討を行なった。

まず、水銀の阻害作用に対して硫酸還元反応がいかなる役割を果たしているのかという点について調べてみると、この反応自体が高い水銀耐性を示し、更に反応の結果生成される硫化物が水銀を無毒化するという特性を持っていることから、この反応はグルコース分解の諸反応を水銀の毒性から予め保護したり、それらの阻害からの回復に大きく寄与していることが結論づけられた。

次に、グルコース分解や通常の嫌気性消化の主要な分解中間体である三種類の VFA からのメタン生成反応に対する水銀の影響を調べたところ、n-酪酸分解>酢酸分解>プロピオン酸分解の順に水銀の阻害作用に対する抵抗力（回復力）が大きく、また水素からのメタン生成>酢酸からのメタン生成の順に水銀の阻害作用に対する抵抗力（回復力）が大きいことが結論づけられた。

クロム含有廃水のフェライト化処理に関する二、三の検討

真島美智雄* 田口 洋治** 小柳 聡* 針谷 工* 吉田 浩*

* 新潟大学工学部応用化学学科 ** 新潟大学工学部化学工学科

〈水質汚濁研究 Vol.9 No.8 (1986) pp.506~513〉

クロム含有廃水をフェライト化処理する場合、時に処理水にクロムが多く残留し、生成フェライトからもクロム（VI）が溶出する。本稿では主にこの対策を稼働しているプロセスに即して幾つか検討し、その結果を示した。

則ち、反応直前のクロム濃度が $10\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 以下なら、 $\text{pH}9.0$, 65°C , 60分の標準的な生成条件で処理出来る。これ以上の濃度では困難であるが、鉄（II）の濃度を2倍の $10\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ に、反応時間を5割増しに、更にアルミニウムを加えると $25\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ の廃水は処理可能である。 $50\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ の廃水では生成条件の変更で、溶出クロムを抑えにくい。クロムだけなら pH を0.8に下げると良いが、妨害する金属もあり、実廃水の場合には必ずしも良い操作とは云えない。溶出量を抑える最良の方法は生成フェライトの乾燥温度を 70°C 以下にすることである。

又、処理に失敗し、フェライトからクロムを溶出する場合の対策やフェライトの一利用法についても言及した。

〈論文〉

水銀による嫌気性消化の阻害について

II. 硫酸還元反応の役割および各種メタン生成反応の水銀感受性

Inhibition of anaerobic digestion by mercury
II. Role of sulfate-reducing process and sensitivity
of each methanogenesis to mercury石川 徳 春* 松本 順一郎*
Tokuharu ISHIKAWA Junichiro MATSUMOTO

Abstract

Inhibitory action of mercury to anaerobic digestion was investigated by batch experiments.

At first, the role of sulfate-reducing process in inhibition of anaerobic digestion by mercury was studied to confirm the previous suggestion¹⁾. It is found that sulfate-reducing process is much more tolerable to mercury than both acidogenesis and methanogenesis and it has an ability to make mercury nontoxic by producing a lot of sulfide as a result of its own metabolism. Owing to these properties described above, it is concluded that this process may greatly contributed to protect all the process in glucose degradation from toxicity of mercury and aid them in recovering from inhibition caused by mercury.

Sensitivity of methanogenesis to inhibitory action of mercury was also studied in detail using three typical intermediates of glucose degradation or usual anaerobic digestion, i.e. acetate, propionate, and n-butyrate. It is concluded that the tolerability to toxicity of mercury (or recoverability from inhibition by mercury) is higher, as the following order, at the process of degradation of n-butyrate, that of acetate, that of propionate, and at methanogenesis from hydrogen, that from acetate.

Key words: anaerobic digestion, mercury, inhibition, sulfate-reduction, methanogenesis

1. はじめに

前報¹⁾に引き続いて報告する。

前報では、嫌気性消化プロセスに対する水銀の阻害作用は全硫化物濃度によって著しく影響を受けることが示されたが、その際、一度水銀によって阻害を受けた系でも時間の経過とともに自然的に阻害から回復するという現象が観察され、それが嫌気的環境中で一般的に見られる硫酸還元反応に起因するものであることが示唆された。また、嫌気性消化プロセスを構成する様々な反応は、水銀の阻害作用に対して異なった応答を示し、特にメタン生成反応は酸生成反応に較べて著しく水銀感受性が高いことも明らかにされた。

そこで本報においては、まず、水銀の阻害作用に対する硫酸還元反応の役割について検討した (Run A-4)。また、通常グルコースからの酸生成に引き続いて

行なわれるメタン生成においては、グルコースの主要な分解中間体である酢酸、プロピオン酸、酪酸などの揮発性脂肪酸 (VFA) および水素²⁾⁻⁵⁾が、メタン生成の基質となっていることが推察されるが、そのうち酢酸および水素からのメタン生成はメタン生成菌によって直接行なわれるものであるのに対し、プロピオン酸や酪酸などからのメタン生成は水素生成アセトジェニク菌⁶⁾⁷⁾とメタン生成菌との共生作用によって行なわれるものである⁸⁾⁻¹⁰⁾ (前報 Fig. 1 参照) ことから、同じメタン生成でも基質によって水銀の阻害作用に対する応答が異なることが十分に予想されることから、上記3種類のVFAを用いて、各種のメタン生成反応の水銀感受性についても検討を行なった (Run M-3)。

* 東北大学工学部土木工学科 〒980 仙台市荒巻字青葉, Department of Civil Engineering, Tohoku University, Aoba, Sendai, 980

Fig. 1 Typical time course of parameters at SR0 in Run A-4 (Vertical axes and symbols; ○-Glucose [mg/l], △-Total VFA [mg-HAc/l], and □-Produced Methane [ml/l at 35°C, 1 atm]).

2. 実験方法

2.1 種汚泥

Run A-4に用いた種汚泥は、前報¹⁾の種汚泥の一部をグルコースを基質として二相的に培養したもののうちのメタン生成槽から採取したものである。ただし、この培養は厳密な二相消化ではなく、酸生成槽の菌体滞留時間(SRT)を約1日、メタン生成槽のSRTを約10日に設定したものであり、酸生成槽は基質としてグルコースを受け、メタン生成槽は酸生成槽の混合液をそのまま移送されていたものである。

一方、Run M-3に用いた種汚泥は、酢酸：プロピオン酸：酪酸(n-酪酸)をCODベースで50：25：25の割合で合計20,000mg-COD/l含んだ混合VFA基質によって、1年以上にわたりSRT約16日で培養されたものである。

なお、培養槽としては、嫌氣的ケモスタット型の反応槽を用い、基質の投入や混合液の移送にマイクロチューブポンプを用いることによって、連続的な培養を行なった。また、培養温度は約35°Cであり、投入基質の無機塩類組成は前報と同一である。

2.2 実験条件および手順

Run A-4およびRun M-3の実験とも、消化槽としてはガラス製バイアルが用いられたが、実験開始時にける反応容積は、90ml, 40mlにそれぞれ設定された。

実験期間中各バイアルは、温度約35°C、振とう数3.5 cm×120回/分に設定された恒温振とう培養水槽中で、連続的攪拌と保温が行なわれた。

実験手順の概要は、前報とほぼ同様である。ただし、Run A-4においては、硫酸還元反応を観察するために、グルコース(基質)の他、設定条件に応じて、硫酸イオンを K_2SO_4 溶液の形で、また硫酸還元反応の特異的阻害剤として知られているモリブデン酸^{11)~14)}を $Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$ 溶液の形で、それぞれ添加した。またRun M-3においては、100Sの各系は、前報Run A-2のSer. SAやRun A-3と同様の手順で予め種汚泥と水銀を接触させ、 Na_2S 溶液の添加時期を上記接触後1分(タイムラグ1分)に設定して、硫化物濃度を高めた(16.0mg/l添加)ものである。

各Runの実験条件を、Table 1にまとめて示す。

2.3 分析項目

Run A-4では、グルコースはアンスロン硫酸法(堀越の方法)で、硫酸イオンは“上水試験方法”¹⁵⁾に準拠した比濁法で、それぞれ分析を行なった。その他、種汚泥についてはMLVSSと硫化物濃度を“下水試験方法”に準拠して、各RunについてはVFAをFID方式の気液クロマトグラフ法で、ガス発生量をシリンジで、ガス組成をTCD方式の固液クロマトグラフ法で、それぞれ測定した。

3. 結果および考察

3.1 水銀の阻害作用に対する硫酸還元反応の役割

前報の実験では、硫化物添加によって、水銀により一度阻害を受けたグルコースからの酸生成反応やメタン生成反応が阻害から回復するという現象が生じ、また、Run A-1の当初反応が阻害された系で、一定時間経過後に反応が自然的に回復し、その際混合液の色調が灰白色から黒色へ変化するという現象が観察された。このことから、水銀による阻害は硫化物によって著しい影響を受け、従って、通常の嫌気的環境中で硫化物を生成する硫酸還元反応とも密接な関係にあることが示唆された。そこで、この点について明らかにするために、Run A-4を行なった。

得られた経時変化のうち、特徴的なものを選んでFig. 1-Fig. 3に示す。

実験の結果、図にも見られるように、水銀濃度100 mg/l以下の各系では、硫酸イオン添加の有無やモリブデン酸添加の有無に関わらず、良好なグルコース分解、酸生成およびメタン生成が観察された。また、硫酸還元反応は、Ser. SR1およびSer. SR2でゆるやかにではあるが徐々に生じたが、モリブデン酸を添加したSer. SR3では観察されなかった。

Table 1 Experimental conditions and characteristics of seeding sludge

RUN No.	MLVSS (mg/l)	SUBSTRATE (mg/l)		MERCURY (mg/l)	SULFIDE (mg-S/l)	IRON* (mg/l)	MOLYBDATE (mM)	TIME LAG
		(GLUCOSE)	(SULFATE)					
A-4	SR0# SR1# SR2# SR3#	480	3900	0 2700 1350 1350	0(#=0), 10(#=1) 50(#=2), 100(#=3) 500(#=4)	21.8	86	0 0 0 4.4
		(HAc)**	(HPr)**	(n-HBu)**				
	A A100S	900	0	0	0,10, 50, 100, 100	7.6 23.6 (16.0 ADDED)	86	— 1 min
	P P100S	0	900	0	0, 10, 50, 100 100	7.6 23.6 (16.0 ADDED)	86	— 1 min
M-3	B B100S	0	0	900	0, 10, 50, 100 100	7.6 23.6 (16.0 ADDED)	86	— 1 min
	M M100 S	300	300	300	0, 10, 50, 100 100	7.6 23.6 (16.0 ADDED)	86	— 1 min

* ; Theoretical values.

** ; mg/l as COD.

Fig. 2 Typical time course of parameters at SR1 in Run A-4 (Vertical axes and symbols; See Fig. 1 and ●-Sulfate [mg/l]).

一方、水銀濃度500mg/lの場合、Fig. 1およびFig. 3に見られるように、Ser. SR04およびSer. SR34ではグルコース分解が完全に阻害された。ところがSer. SR14においては、Fig. 2に示されるように、実験開始後7.5日目まではグルコース分解が他のSer.同様見られなかったが、その後阻害から自然的に回復し、14.5日目にはグルコースがほぼ完全に上澄液中から消失したことがわかる。そして、この間の混合液の色調の外見的観察によれば、阻害されていた時は混合液は灰白

Fig. 3 Typical time course of parameters at SR3 in Run A-4 (Vertical axes and symbols; See Fig. 2).

色を呈していたのに対し、阻害から回復した時点では黒色に変化していたことがわかった。一方、硫酸イオン無添加のSer. SR04やモリブデン酸添加のSer. SR34では、上記のような混合液の色調の変化は全く見られず、グルコース分解も完全に停止したままであったことから、Ser. SR14で生じた阻害からの自然的回復という現象は、硫酸還元反応に起因するもの(それによって生成された硫化物によるもの)であることが結論づけられる。

なお、Fig. 2 において Ser. SR14 で阻害回復前に顕著に硫酸塩濃度が減少するというような変化は見られないが、この系では、種汚泥中の硫化物濃度が約140 mg/lの水銀濃度とモル等量であり、残りの360mg/lの水銀と結合するのに必要な硫化物を生成するために必要とされる硫酸塩は僅か1.8mM（添加量28mMの約6%）であることから、顕著に硫酸塩濃度が減少しなくても、阻害からの回復は生じることがわかる。また、このことから、Ser. SR14 で見られたような混合液の色調変化は、前報の Fig. 7 で示したような平衡移動により灰白色を呈するようになった混合液が、硫酸還元反応によって生じた S^{2-} により直ちに“余剰”の Hg^{2+} が HgS に変えられた後に更に“過剰”に発生した S^{2-} によって $FeCO_3$ （白色）が FeS （黒色）に再び変えられて黒色を呈するようになる、という機構によって生じるものと説明づけることができる。従って、混合液の色調変化は、反応再開の合図ではなく、阻害要因（ Hg^{2+} ）の除去が終了したことを示す合図であると考えることができる。反応が再開するかどうか、 Hg^{2+} 除去後いつ再開するかなどということは、その反応の水銀感受性・回復力によって異なってくるものと思われる。

また、Ser. SR14 の結果および上記の考察より、阻害からの回復機構を担う硫酸還元反応は、水銀濃度500 mg/lあるいは‘free Hg^{2+} ’=360mg/lという条件下でも進行しうるものであることが示唆され、グルコースからの酸生成反応よりも更に水銀耐性があることが結論づけられる。このことは、硫酸還元反応を行なう硫酸還元菌が、自らが生成する S^{2-} によって重金属を沈殿・無毒化することができる^{16)~19)}ことや、*Desulfovibrio desulfuricans* の $HgCl_2$ に関する最小阻害濃度が1000mg/lであると報告されている¹⁶⁾ことや、更に *Desulfotomaculum* 属は芽胞形成能があるが、同じ芽胞形成菌である *Bacillus* 属の孢子殻タンパク質が異常に高いシステイン含量を示す²⁰⁾こと、などを考え合わせるならば、極めて妥当なものであると思われる。

更に、Fig. 2 の Ser. SR14 の経時変化を見てみると、グルコース分解の後に酸生成が生じているが、この時の生成 VFA はデータとして示していないが主として酢酸であり、またメタンは全く生成しなかったことから、前報で結論づけた各反応の水銀感受性は妥当なものであり、従って、硫酸還元反応>酸生成反応（酢酸生成反応>n-酪酸生成反応）>メタン生成反応の順に水銀耐性が高いことが結論づけられる。

3.2 各種のメタン生成反応の水銀感受性

グルコースからメタンを生成させる経路には、Fig. 4 に示されるようなものが考えられている²¹⁾。

Fig. 4 Scheme of pathways of anaerobic degradation of glucose.

これまでの実験では、メタン生成反応が非常に高い水銀感受性を持っていることが明らかにされたが、Fig. 4 に示されているような、グルコース分解によって生成する3つの主要なVFAからの各種のメタン生成経路間の水銀感受性の差異については、全く結論を得ることができなかった。そこで、Run M-3を行ない、この点についての検討を行なった。

Fig. 5 および Fig. 6 に、得られた経時変化のうち、特に注目すべきものを選んで示す。

Fig. 5 に見られるように、水銀濃度が50mg/l以下においては、各 Ser.とも水銀濃度の増加に伴って反応開始の遅れ（ラグの増大）とメタン生成速度の低下が観察された。また、水銀濃度100mg/lの場合は、各 Ser.とも反応が完全に阻害され、一方、水銀濃度100 mg/lで硫化物16.0mg/lが添加（タイムラグ1分）の場合は、各 Ser.とも水銀濃度が50mg/lの場合よりも更に遅れてメタン生成反応が観察された。

次に、各 VFA からのメタン生成の様子について見てみると、Fig. 6 にも示されているように、プロピオン酸の分解は低水銀濃度においても極めて遅く、更に、

Fig. 5 Time course of methane production at Ser.A in Run M-3 (Symbols; ○-A0 [0 mg-Hg/l], ●-A10 [10 mg-Hg/l], ▲-A50 [50 mg-Hg/l], ▼-A100 [100 mg-Hg/l], and ■-A100S [100mg-Hg/l with sulfide addition]).

Fig. 6 Time course of individual VFA at Ser. M in Run M-3 (Symbols; ○-M0 [0 mg-Hg/l], ●-M10 [10 mg-Hg/l], ▲-M50 [50 mg-Hg/l], and ■-M100S [100 mg-Hg/l with sulfide addition]).

酢酸やn-酪酸は分解されうる水銀濃度50mg/lおよび100S mg/lにおいてもSer. Mの系ではプロピオン酸の分解は完全に停止していたことがわかる。このことから、通常の嫌気性消化の条件下でも律速段階になっていると思われるプロピオン酸の分解¹⁰⁾²¹⁾²²⁾(プロピオン酸からの酢酸生成)が、最も高い水銀感受性を持っていることが結論づけられた。

一方、実験開始後12日目まではいかなる反応も観察されなかった水銀濃度100mg/lの各Ser.のバイアルについて、62日目および105日目に分析を行なったところ、Table 2に示されるような結果が得られた。即

ち、Ser. A100 および Ser. P100 においては、阻害からの回復は全く生じなかったのに対し、Ser. B100 および Ser. M100 ではn-酪酸の分解とそれに伴う酢酸の蓄積が観察された。このことから、n-酪酸の分解(n-酪酸からの酢酸生成)は酢酸の分解(酢酸からのメタン生成)よりも水銀の阻害作用に対して抵抗力がある(回復力がある)ことがわかる。

以上の結果より、グルコースの主要な分解中間体である3種類のVFAの分解反応の水銀感受性は、プロピオン酸分解>酢酸分解>n-酪酸分解、の順に高いことが結論づけられる。

次に、酢酸からのメタン生成反応と水素からのメタン生成反応の水銀感受性の差異について、若干の検討を行なった。ただし、Table 2に示されている各VFAのCOD収支が完全にはとれていないため厳密性に欠けるくらいがあることを予め断っておく。

今、n-酪酸の分解が

という反応により行なわれる²¹⁾ものとする、n-酪酸が1 g-COD/l減少すれば、酢酸と水素はそれぞれ0.8g-COD/l、0.2g-COD/lずつ増加することがわかる。

一方、生成した水素からは

という反応によってメタンが生成され、水素1 g-COD/lからはメタン1 g-COD/lが生成されることがわかる。

そこで、n-酪酸の分解が生じたSer. B100 および Ser. M100 について見てみると、実験開始後62日目の時点で、前者のn-酪酸の減少量は約130mg-COD/l、後者では約290mg-COD/lであることから、水素の予想発生量としてはそれぞれ約30mg-COD/l、約60mg-COD/lという値が求められる。しかし、この時点で実際に水素を分析してみると、両Ser.とも水素は検出されず、その代わりにメタンが約30mg-COD/l、約70mg-COD/lそれぞれ生成していることが確認された。このことから、両Ser.とも、n-酪酸の分解に伴って生成された水素からのメタン生成反応が生じていた

Table 2 Time course of individual VFA and methane at each Ser. 100 (100 mg-Hg/l) in Run M-3

TIME COURSE	Ser. A100 (mg-COD/l)				Ser. P100 (mg-COD/l)				Ser. B100 (mg-COD/l)				Ser. M100 (mg-COD/l)			
	HAc	HPr	HBu	CH ₄	HAc	HPr	HBu	CH ₄	HAc	HPr	HBu	CH ₄	HAc	HPr	HBu	CH ₄
0h	1090	60	0	60	20	830	10	60	20	50	910	60	350	300	300	60
62d	1100	70	10	—*	60	820	50	—	150	60	780	90	680	320	10	130
105d	1070	90	10	—	120	810	0	—	870	80	10	—	670	310	10	—

* ; "—" means "not analysed".

ことが示される。

以上のように、*n*-酪酸は分解され、それに伴って酢酸は蓄積し、一方水素は検出されずにメタンが検出されたということから、水素からのメタン生成反応は酢酸からのメタン生成反応よりも水銀耐性であることが推察される。

4. ま と め

嫌気性消化プロセスにおける水銀の阻害作用に対して硫酸還元反応がいかなる役割を果たしているのかについて、また、通常の嫌気性消化プロセスやグルコース分解の過程で中間代謝産物として生じる代表的な3種類のVFAからのメタン生成反応の水銀感受性について、それぞれ検討を行なった結果、以下の結論が得られた。

1. 硫酸還元反応は、グルコースからの酸生成反応よりも水銀の阻害作用に対して抵抗力があり、そのため硫酸イオン存在下では硫化物を生成し水銀を無毒化することができ、他のグルコース分解反応の阻害からの回復に大きく寄与している。なお、上記の水銀の無毒化の完了は、混合液の灰白色から黒色への変化によって確認することができる。
2. 酢酸や水素からは直接メタンが生成し、プロピオン酸や*n*-酪酸からは酢酸および水素への分解がまず起こり、それに引き続いてメタンが生成される、というメタン生成機構を考慮した上で、各反応の水銀感受性について見てみると、
 - ① VFAの分解という点では、*n*-酪酸の分解>酢酸の分解>プロピオン酸の分解 という順に、水銀の阻害作用に対して抵抗力(回復力)がある。
 - ② メタン生成という点では、水素からのメタン生成>酢酸からのメタン生成 という順に、水銀の阻害作用に対して抵抗力(回復力)がある。
 ということが結論づけられる。

以上、本報で得られた結論と、前報¹⁾で得られた結論とを考え合わせることによって、嫌気性消化プロセスに水銀が流入してきた場合、プロセスがどのような応答を示し、どのような現象が現われるかということが、おおよそ明らかになったものと思われる。即ち、通常本プロセスには、今回の一連の実験で設定されたような高濃度の水銀が直接流入してくることはないと思われるが、例えば活性汚泥にある程度濃縮されて水銀が流入してきた場合には、その時点での全硫化物のモル濃度との大小関係によって、何らかの阻害が生じる可能性のあることが示唆されるのである。

今回の実験で得られたような、嫌気性消化プロセスを構成する様々な反応が水銀の阻害作用に対して異なる感受性・耐性・回復力を持っているということ、とりわけプロセスの有機物除去という点で主要な役割を担っている酢酸からのメタン生成反応が最も水銀感受性が高いということは、プロセス全体の効率化を図る上で、充分に考慮する必要があるものと思われる。

謝 辞 本研究を行なうにあたり、実験の面で御尽力下さった東北大学工学部学生(当時)中山拓郎君に心から感謝いたします。

(原稿受理 昭和61年4月21日)

引 用 文 献

- 1) 石川徳春, 松本順一郎(1985) 水銀による嫌気性消化の阻害について I. 硫化物の影響および酸生成とメタン生成の水銀感受性, 水質汚濁研究, 8, 9, 577-586.
- 2) Ghosh, S. and Pohland, F. G. (1974) Kinetics of Substrate Assimilation and Product Formation in Anaerobic Digestion. *Journal of Water Pollution Control Federation*, 46, 748-759.
- 3) Cohen, A., Zoetemeyer, R.J., van Deursen, A. and van Andel, J. G. (1979) Anaerobic Digestion of Glucose with Separated Acid Production and Methane Formation. *Water Research*, 13, 571-580.
- 4) 遠藤銀朗, 野池達也, 松本順一郎(1982) 嫌気性消化の酸生成相におけるセルロースとグルコースの分解特性, 土木学会論文報告集, 325, 61-68.
- 5) Zoetemeyer, R.J., van den Heuvel, J.C. and Cohen, A. (1982) pH Influence on Acidogenic Dissimilation of Glucose in an Anaerobic Digester. *Water Research*, 16, 303-311.
- 6) Bryant, M.P. (1976) The Microbiology of Anaerobic Degradation and Methanogenesis with Special Reference to Sewage. In "Microbial Energy Conversion." Shelegel, H.G. and Barnea, J. (Ed.) 107-117, Erich Goltze KG, Göttingen.
- 7) Bryant, M.P. (1979) Microbial Methane Production-Theoretical Aspects. *Journal of Animal Science*, 48, 193-201.
- 8) Zeikus, J.G. (1977) The Biology of Methanogenic Bacteria. *Bacteriological Review*, 41, 2, 514-541.
- 9) Mah, R.A., Ward, D.M., Baresi, L. and Glass, T. L. (1977) Biogenesis of Methane. *Annual Review of Microbiology*, 31, 309-341.
- 10) 花木啓祐, 松尾友矩, 長瀬道彦(1981) 嫌気性消

- 化における脂肪酸の代謝, 下水道協会誌, **18**, 207, 30-39.
- 11) Smith, R.L. and Klug, M.J. (1981) Electron Donors Utilized by Sulfate Reducing Bacteria in Eutrophic Lake Sediments. *Applied and Environmental Microbiology*, **42**, 1, 116-121.
- 12) Capone, D.G., Reese, D.D. and Kiene, R.P. (1983) Effects of Metals on Methanogenesis, Sulfate Reduction, Carbon Dioxide Evolution, and Microbial Biomass in Anoxic Salt Marsh Sediment. *Applied and Environmental Microbiology*, **45**, 5, 1586-1591.
- 13) Derek, R.L., Daryl, F.D. and Michael, J.K. (1982) Kinetic Analysis of Competition Between Sulfate Reducers and Methanogens for Hydrogen in Sediments. *Applied and Environmental Microbiology*, **43**, 6, 1373-1379.
- 14) Nedwell, D.B. and Banat, I. M. (1981) Hydrogen as an Electron Donor for Sulfate-Reducing Bacteria in Slurries of Salt Marsh Sediment. *Microbial Ecology*, **7**, 305-313.
- 15) 上水試験方法 (1978年版), 日本水道協会
- 16) Postgate, J.R. (1979) The Sulfate-Reducing Bacteria. Cambridge University Press, Cambridge.
- 17) Gadd, G.M. and Griffiths, A.J. (1978) Microorganisms and Heavy Metal Toxicity. *Microbial Ecology*, **4**, 303-317.
- 18) Lawrence, A.W. and McCarty, P.L. (1965) The role of Sulfide in Preventing Heavy Metal Toxicity in Anaerobic Treatment. *Journal of Water Pollution Control Federation*, **37**, 3, 392-406.
- 19) Bachenheimer, A.G. and Bennett, E.O. (1961) The Sensitivity of Mixed Populations of Bacteria to Inhibitors. I. The Mechanism by which *Desulfovibrio desulfuricans* Protects *Ps. aeruginosa* from The Toxicity of Mercurials. *Antonie van Leeuwenhoek*, **27**, 180-188.
- 20) スタニエ, R.Y., エーデルバーグ, E.A., イングラム, J.L. (1978) 微生物学 (上), (下), 培風館, 東京.
- 21) Duarte, A.C. and Anderson, G.K. (1982) Inhibition Modelling in Anaerobic Digestion. *Water Science and Technology*, **14**, 749-763.
- 22) 張祖恩, 野池達也, 松本順一郎 (1983) 嫌気性消化のメタン生成相における混合基質の利用特性, 土木学会論文報告集, **335**, 79-87.