

# 嫌気性処理を組み込んだ下水の高度処理に関する実験的研究

高 島 正 信

## Advanced wastewater treatment incorporating anaerobic process

Masanobu Takashima

In this study, an UASB (Upflow anaerobic sludge blanket) reactor was applied to realize economical municipal wastewater treatment. To overcome its disadvantages, anoxic and aerobic reactors were combined as the polishing step for organics as well as nutrients such as nitrogen and phosphorus. The wastewater treated was taken from a combined sewer system in Fukui City, Japan. The experimental results showed that the lab-scale UASB reactor works like a SS removal filter, and causes occasional vast release of SS accumulated in the reactor. Nitrogen was removed by the biological anoxic-aerobic process, and phosphorus was removed as iron phosphate using an iron net submerged in the aerobic reactor. The polishing step was successful for achieving excellent effluent quality with minimum maintenance.

### 1. はじめに

活性汚泥法は、好気的条件下で有機物を微生物学的に酸化分解する、下水処理の代表的な方法である。しかしながら、この方法はエアレーション操作、余剰汚泥処理に膨大なエネルギーを消費するため、将来に向けての持続可能性に乏しい。そのため近年では、エネルギー面で有利な嫌気性微生物処理法が注目されるようになってきている。なかでも UASB (Upflow anaerobic sludge blanket) 法は、活性と沈降性に優れた塊状のグラニュール汚泥を形成させて高速処理を可能にした嫌気性処理法であり、従来の好気性処理に比べて(1) 曝気が必要ないため経済的、(2) 余剰汚泥の発生量が少ない、(3) 維持管理が容易、(4) メタンガスとしてエネルギー回収が可能などの長所を有している<sup>1)</sup>。元々は中・高濃度の工場排水処理向けに開発されたものであるが、下水のような低濃度排水の処理へも普及が期待されている。

ところが、UASB 法単独で下水処理する場合、処理水質が放流レベルにまで達しないという問題がある。また、湖沼・内湾等において富栄養化の原因となる窒素・りんが除去できないという問題もある。したがって、嫌気性処理法を下水処理に適用する際には仕上げ処理を組み合わせる必要がでてくるが、嫌気性処理と組み合わせるにふさわしい仕上げ処理については十分に検討されているとはいいがたい。特に、富栄養化対策として窒素・リンの除去機能を付加しておくことが今後の下水処理には必要不可欠である。そこで本研究では、UASB リアクターに無酸素および好気リアクターを仕上げ処理として組み合わせた下水処理システムを新たに考案し、有機物を経済的に除去しながら、窒素・りんを同時除去する可能性を実験的に検討した。

---

\* 原子力技術応用工学科

## 2. 実験方法

### 2-1 実験装置および運転方法

供試下水として、福井市内の下水処理場の最初沈殿池越流水を用いた。処理対象人口が約1万人以下の小規模下水処理においては、下水を沈殿しないで通水し、嫌気性リアクターに最初沈殿池の機能も同時に持たせることが多いが、ここでは中～大規模を想定して最初沈殿後の越流水を流入水とした。

実際の下水は年間を通じて水質、温度等の変動がある。また、実験装置を設置した下水処理場は合流式の下水収集方式であるため晴天時と雨天時における流入下水の質的および量的な差が大きいので、本研究では約3ヶ月間の連続実験によって検討した。

実験装置を図1に示す。嫌気リアクターは、アクリル樹脂製のUASB型（有効容積7.9L）で、流入水の投入ポンプと発生ガス用のトラップおよびガスバックが接続されたものである。種グラニュール汚泥には、工場排水を処理する実規模UASB型リアクターから採取したものを4L用いた。流入量は、約94L/日（水学的滞留時間HRT約2時間）の一定量に設定した。

嫌気リアクター処理水の仕上げ処理は、アクリル樹脂製の無酸素リアクター（有効容積5L）、塩ビ製の好気リアクター（同10L）および最終沈殿池（同6L）、エアポンプ、返送汚泥ポンプ、循環ポンプなどからなる。窒素除去は、無酸素および硝化リアクターを連結した微生物学的な循環式硝化・脱窒法で行った。また、無酸素リアクターには高効率化をねらってスポンジ担体（ポリウレタン製12x12x15mm、リアクター容積の30%）を微生物付着のための担体として用いた。りん除去は、硝化リアクターに鉄製金網（1kg）を挿入することによってりん酸鉄として除去する方法である。微生物学的なりん除去法は合流式下水のような変動の激しいものに対しては不安定であるので、このような化学的りん除去法を採用した。

無酸素および好気リアクターの種汚泥は同じ下水処理場のエアレーションタンクより採取した活性汚泥で、その濃度は約2,400 mg/Lであった。処理量は約60 L/日に設定したので、滞留時間は無酸素リアクター約2時間、好気リアクター約4時間となり、嫌気リアクターを含む合計が標準活性汚泥法と同じ約8時間とした。好気リアクターから無酸素リアクターへの循環量は約60 L/日（循環率約100%）に設定し、最終沈殿池から

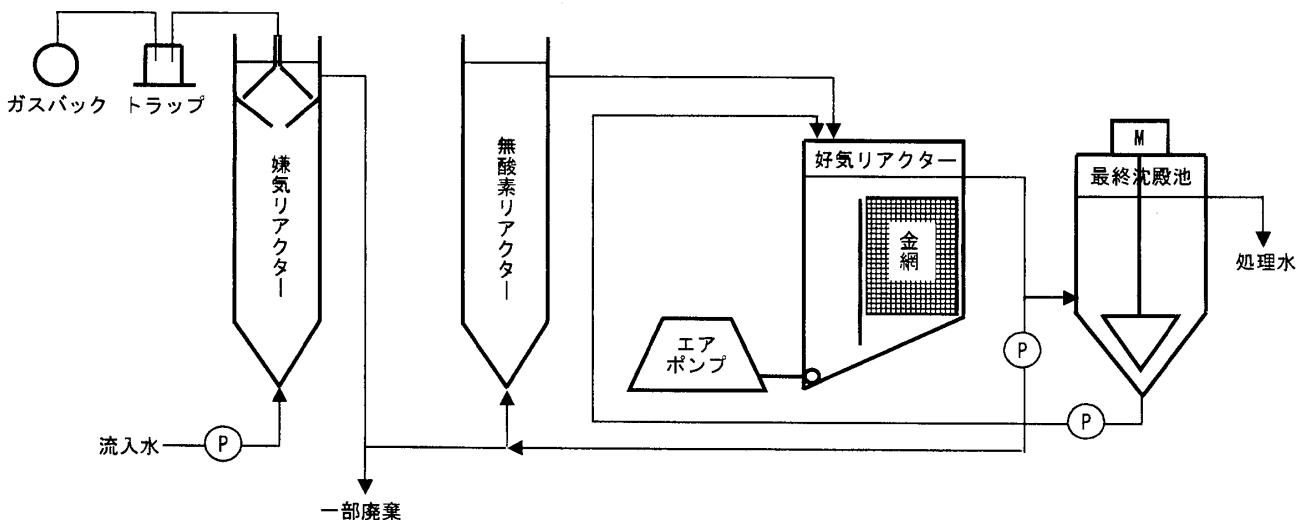


図1 実験装置の概略

好気リアクターへの返送汚泥量は約 30 L/日（返送率約 50%）に設定した。好気リアクターの溶存酸素（DO）濃度はおおむね 2 mg/L になるように調節した。無酸素および好気リアクターの汚泥引き抜きは、汚泥の蓄積が著しいときのみ無酸素リアクターより数回実施した。

## 2-2 分析方法

分析は、流量、温度、pH および DO（溶存酸素）についてはほぼ毎日、BOD（生物化学的酸素要求量）、SS（浮遊物質）、T-N（全窒素）、T-P（全りん）、 $\text{NO}_{2,3}\text{-N}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$  および  $\text{PO}_4\text{-P}$  については週一回の頻度で行った。その方法は Standard Methods<sup>2)</sup>に従ったが、T-N、T-P の測定については前処理としてアルカリ性ペルオキソ二硫酸カリウム分解法<sup>3)</sup>を施して無機態に転換したものについて実施した。溶解性液の作成にはろ紙 5 C を用いた。

ガス成分の分析（ $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$  および  $\text{N}_2$ ）は、TCD 検出器付きガスクロマトグラフ（GC-9A、島津製作所）を用い、カラム Parapak Q、キャリアガス Ar；40mL/min、カラム温度 40℃、注入口温度 120℃、検出器温度 120℃の条件で分析した。ガスバックに捕集された発生ガスは、ガス成分の分析後、湿式ガスメーター（WS-1A、シナガワ）で計量した。 $\text{NO}_{2,3}\text{-N}$  の測定にはイオンクロマトグラフ（DX120、ダイオネックス）を用い、 $\text{PO}_4\text{-P}$  にはアスコルビン酸法（Standard Methods 4500E）を適用した。

## 3. 実験結果および考察

実験は秋期から冬期にかけて 84 日間実施した。この期間中における水温および HRT の経日変化を図 2 に、BOD、SS、T-N および T-P の経日変化を図 3 に示す。また、流入水および各処理水の平均濃度などをまとめたものを表 1 に示す。

### 3-1 嫌気性処理

実験期間中における水温はおおむね 8～25℃、処理水 pH は 7 付近であった。また、HRT は計画通り約 2 時間に維持された。図 3 からわかるように、合流式下水道方式であることもあって流入水濃度の変動が大きかった。UASB 処理水質の変動も激しかったが、その理由の一つとして、流入した SS が UASB 型リアクター内に蓄積し、それが時々処理水中に高濃度に流出したことが考えられる。結果として、嫌気性処理における平均の BOD 除去率および SS 除去率はそれぞれ 35%、59%（突発的な値を除く）となった。以前実施した同様の実験<sup>4)</sup>では、UASB 型リアクターは有機物の分解除去よりも、グラニュール汚泥層によるろ過作用により SS 除去リアクターとして機能していると結論付けられた。また、嫌気性下水処理では水温が 20℃を切ると微生物分解が進まないと報告されており<sup>1)</sup>、本実験においても溶解性有機物の除去率が約 10%と小さかったことから（図示なし）、主に SS 除去に伴い固形性の BOD が除去されたと考えられる。

ガス発生量については、メタンガスとして平均約 0.1L/日の回収量であった。BOD 除去量に基づく約 1.4L/日の理論発生量となるが、実際のメタン回収量が低くなった理由として、メタンが処理水中に溶解して流出することや、SS 成分が未分解のままリアクター内に蓄積していたことなどが考えられる。

今回の運転経験から、リアクター内に捕捉され、分解されずに蓄積した汚泥については、処理水中に流出しないよう定期的に引き抜く必要があることがわかる。また、発生ガスがリアクター下部に溜まることによって

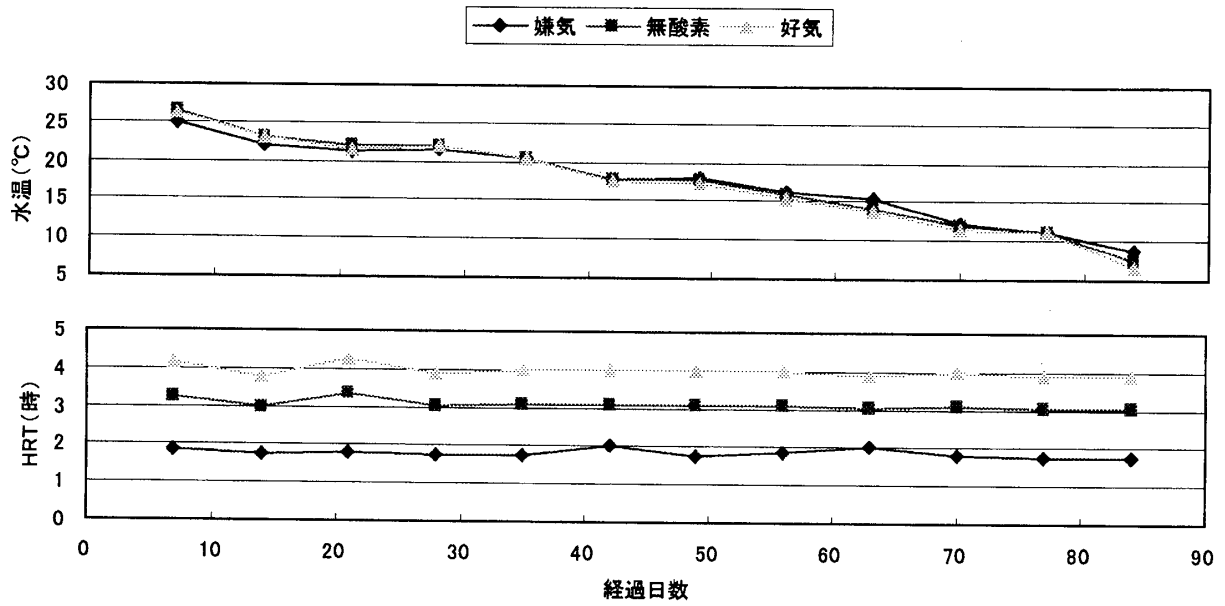


図2 水温およびHRTの経日変化

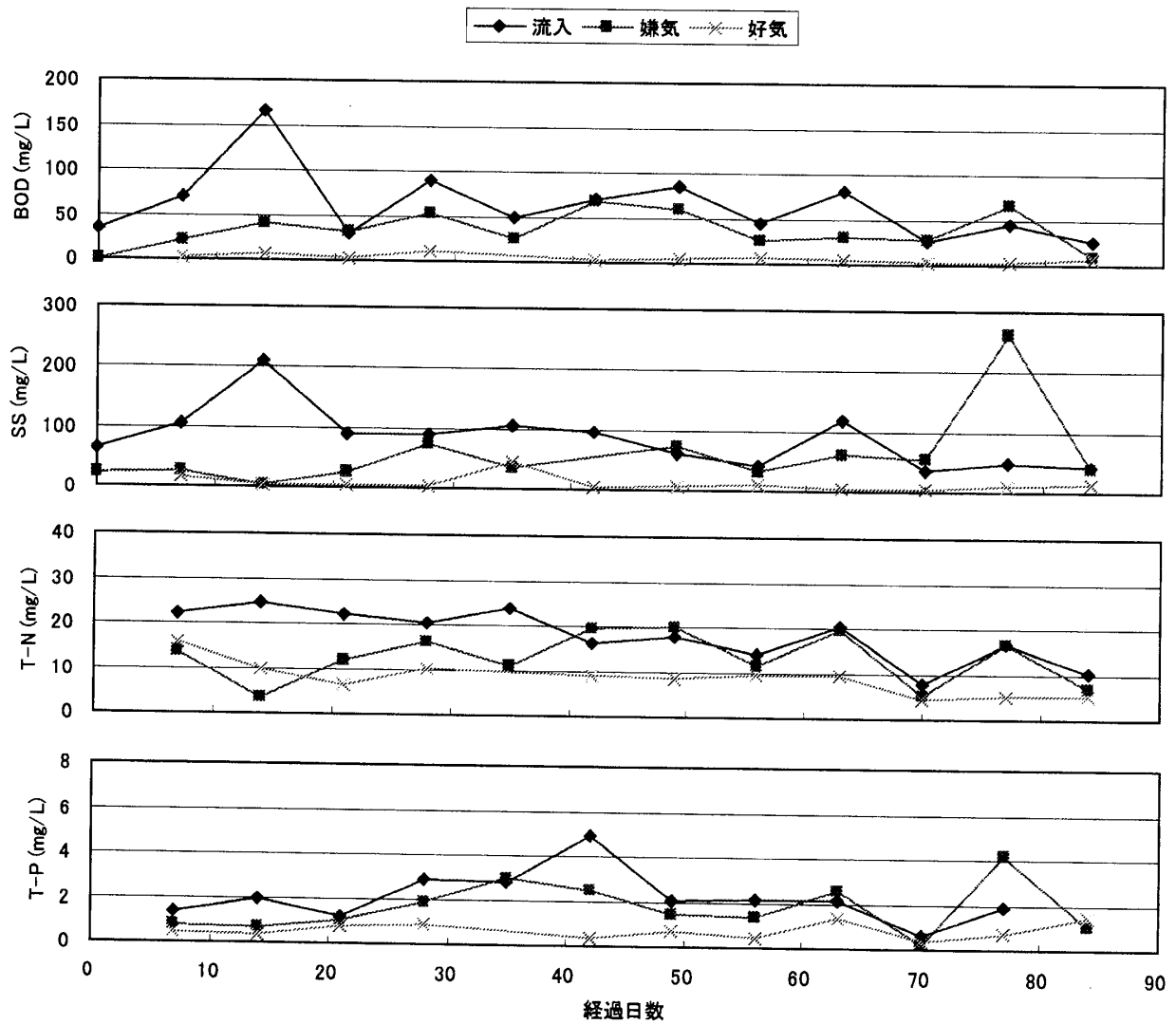


図3 BOD、SS、T-NおよびT-Pの経日変化

汚泥が浮上することがあり、これも SS 成分の突発的な流出につながった。この現象は寸法の大きい実規模装置では見られないが、小規模実験装置の場合には緩やかに回る攪拌装置を設けて、ガス抜けを促す必要があると思われる。

今回の実験結果は、低濃度かつ低水温の排水に対する嫌気性処理の限界を再度示すこととなった。しかし、微量金属添加による嫌気性微生物の活性化、減圧条件下の運転<sup>4)</sup>などの改善方法も提案されているので、今後さらなる取り組みが望まれる。

表 1 流入水および各処理水の平均水質

	流入水	処理水	
		嫌気	好気
BOD (mg/L)	62.7±38.3	34.8±20.9	4.7±2.8
SS (mg/L)	84.8±47.6	58.7±67.3*	9.4±12.0
T-N (mg/L)	18.1±5.3	13.0±5.6	8.5±3.2
NO <sub>3</sub> -N (mg/L)	1.0±0.5	0.2±0.3	3.9±2.7
T-P (mg/L)	2.18±1.14	1.72±1.14	0.69±0.40
PO <sub>4</sub> -P (mg/L)	1.01±0.60	0.60±0.42	0.34±0.18
ガス発生量 (L/日)	---	0.82±0.77	---
ガス CH <sub>4</sub> 濃度(%)	---	10.8±7.4	---
BOD 除去率 (%)	---	31.8±38.1	91.8±7.4
SS 除去率 (%)	---	38.5±50.1*	86.8±13.3
T-N 除去率 (%)	---	24.9±30.0	54.7±18.9
T-P 除去率 (%)	---	16.9±55.7	66.8±22.8

\*異常に高い値を除く。

### 3-2 仕上げ処理

仕上げ処理については、図 2 のように HRT は計画通りの無酸素リアクター約 2 時間、好気リアクター約 4 時間に運転された。pH はどのリアクターでも 6~7 の間であり、また、好気リアクター DO はおおむね 2~3 mg/L とほぼ十分の濃度に維持された。好気リアクターの処理水は、嫌気リアクターの結果と反対に BOD および SS はほとんどの場合 10mg/L 以下と水質が安定かつ良好であった。窒素については、T-N が平均して濃度 8.5mg/L、除去率 54%と、一般的な高度処理の目標をクリアする満足できる結果であった。

循環式脱窒法による窒素は、以下のような連続的な微生物反応によって除去される。

無酸素槽： $\text{NO}_3^- (\text{NO}_2^-) \rightarrow \text{N}_2$  (脱窒細菌による硝酸 (または亜硝酸) の窒素ガスへの脱窒)

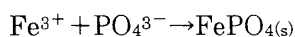
好気槽： $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_3^- (\text{NO}_2^-)$  (硝化細菌によるアンモニアの硝酸 (または亜硝酸) への硝化)

また、このときの理論的窒素除去率  $E$  (%) は、下式で与えられる<sup>5)</sup>。

$$E = R / (1 + R) \times 100$$

ここで、 $R$ ：循環比 (硝化液循環量の流入下水量に対する比)。今回は循環率が約 100% ( $R=1$ ) であったので、 $E$  は 50%と計算され、おおむねこの計算値に近い実験値が得られている。残存していた窒素成分は実験の前半は  $\text{NO}_3\text{-N}$  が多く、後半になるとそれが少なくなる一方、 $\text{NH}_3\text{-N}$  が増える傾向にあった (図示なし)。これはおそらく、硝化細菌による  $\text{NH}_3$  から  $\text{NO}_3$  への硝化活性が水温の低下に伴って低下した結果であると考えられる。一方、仕上げ処理への流入水 (つまり、UASB 型嫌気リアクターの処理水) の平均 BOD/T-N 比は 2.7 となっており、理論的に必要な約 3<sup>5)</sup>と比べると、脱窒が良好に進行するにはぎりぎりと考えられる有機物濃度であった。嫌気リアクターで十分な有機物の除去が行われていなかったことが却って幸いしたと思われる。

りんについては、一般的な高度処理の目標である 1mg/L 以下が安定に維持されていた。その結果、T-P は平均除去率 67%の比較的高い除去率が得られた。本実験における下水中のりんは、下式に示すように、りん酸イオンと鉄材から溶出した鉄イオンによるりん酸鉄生成によって化学的に除去される。



小川ら<sup>6)</sup>によると、スチールウールのような表面積の大きいものの方が鉄の溶出速度が大きく好ましい傾向にあるが、生活排水中の90%以上のりん除去を2ヶ月間達成する鉄材充填量として最低7g/Lは必要であると報告している。今回の鉄材充填量は約100g/Lとなり、この条件を十二分に満たすことが良い結果につながったと思われる。今回の実験から、りんについては、このような鉄材を用いる簡易的な方法によっても十分に効果のあることが示された。この方法は鉄材に付着するSSなどを定期的に除去するだけでよく、維持管理性において他の方法よりきわめて優位であることから、今後の実用化に期待したい。

#### 4. 結論

本研究では、下水の最初沈殿池越流水を対象として、UASB型嫌気リアクターと無酸素・好気リアクターを組み合わせた処理システムによる84日間の処理実験を実施し、嫌気性微生物処理を組み込んだ低濃度排水の高度処理の可能性について検討した。

嫌気リアクターは、浮遊物質除去装置としての機能が主であり、有機物除去に関しては高い処理効率が得られず、メタン回収量も少なかった。今回の運転経験から、リアクター内に捕捉され、分解されずに蓄積した汚泥については、処理水中に流出しないよう定期的に引き抜く必要があることがわかった。

仕上げ処理については、好気リアクターの処理水質はBODおよびSSがほとんどの場合10mg/L以下と良好な水質であった。水温が低くなると $\text{NH}_3\text{-N}$ が増加傾向にあったものの、ほぼすべての分析について一般的な目標である $\text{T-N}$ 10mg/L以下、 $\text{T-P}$ 1mg/L以下が達成された。嫌気性微生物処理は窒素・りんを単独では処理できない欠点があるが、適切な仕上げ処理プロセスを組み合わせることによって、有機物と栄養塩類の同時除去が可能なが実証されたと思われる。

今後の課題として、嫌気リアクターにおけるメタン回収の改善と、それに応じた仕上げ処理における栄養塩類除去があげられる。

#### 謝辞

実験に使用したグラニュール汚泥は(株)栗田工業依田元之氏から提供していただきました。また、本研究の一部は平成18年度福井工業大学特別研究費の補助によって実施しました。ここに記して感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 松井三郎、高島正信：産業廃水処理のための嫌気性バイオテクノロジー、技報堂出版、1999.
- 2) APHA, AWWA and WEF: *Standard Methods*, 20th ed, 1998.
- 3) M. Hosomi and R. Sudo: Simultaneous determination of total nitrogen and total phosphorus in freshwater samples using persulfate digestion, *Int. J. Environmental Studies*, Vol.27, p.267-275, 1986.
- 4) 高島正信：平成16～17年度科学研究費補助金(基盤研究C)研究成果報告書、2006.
- 5) (社)日本下水道協会：下水道施設計画・設計指針と解説、1994.
- 6) 小川雄比古ら：嫌気槽に鉄材を浸漬する簡易なりん除去、水環境学会誌、Vol.20, p.89-94, 1997.

(平成20年3月31日受理)