

(4) 下水三次処理用の2床式好気性ろ床に関する研究

Use of a new aerated filter with 2-media for tertiary treatment of sewage

○ 石川 進*、馬場郁子*、鈴木辰彦*、柿井一男**、白樫高史***

Susumu-ISHIKAWA*, Ikuko-BABA*, Tatsuhiko-SUZUKI*, Kazuo-KAKII**, Takashi-SHIRAKASHI***

ABSTRACT; Aerated filters have the dual function of biological oxidation and filtration and are expected to replace rapid sand filters in tertiary treatment of sewage. Tertiary-treated sewage can have a high nitrogenous biochemical oxygen demand if there is inadequate nitrification, and it is important to keep nitrification levels in the treatment system high throughout the year. In an effort to develop an aerated filter with high nitrification capabilities, we formulated a new filter with two media. This filter has 2 layers. The upper layer is filled with a plastic medium and the lower with anthracite. We tested the filter with a pilot-scale apparatus on secondary-treated sewage. In the initial experiment, we filled the upper layer with a medium that had a small specific surface area (Type A, specific surface area about $500 \text{ m}^2/\text{m}^3$), and the medium was fixed with perforated plates. In second experiment, we filled the upper layer with a medium that had a large specific surface area (Type B, specific surface area about $800 \text{ m}^2/\text{m}^3$), and the medium was fluidized by aeration. Higher nitrification performance was achieved in the second experiment: the nitrification rate was $0.87 \text{ kgN}/\text{m}^3$ per whole bed volume per day, at a water temperature of 20°C . A comparison between this second experiment and the initial experiment suggests that this improvement was due to an increase in the specific surface area of the medium.

KEYWORDS; aerated filter, 2-media filter, fluidized bed, tertiary treatment, nitrification

1. はじめに

下水道普及率の向上とともに、放流水域の環境保全あるいは処理水有効利用の観点から、高度処理の必要性は益々高まっている。特に、下水処理水の有効利用を目的とした再生水技術に関する研究は、これまでも数多くなされている^{1)~4)}。その中で、急速ろ過は、比較的安価であり、BODおよびSS成分の除去効果が大いことから、実用化されてきた技術である^{5), 6)}。上向流式、下向流式、移動床式等があるが、いずれもろ過速度を $200\text{m}/\text{日}$ 程度とするのが一般的であり、設計手法としてもほぼ確立している技術である^{7), 8)}。急速ろ過においても生物反応の存在が報告されているが⁹⁾、主には、物理的な固液分離作用であり、溶解性有機物やアンモニア性窒素等の除去はあまり期待できない。

一方、好気性ろ床は、急速ろ過とほぼ同等の設備で、ろ床内を好氣的に保つことにより、物理的なろ過作

* 前澤工業(株)環境事業本部研究開発部(Department of research and development, Headquarters of environmental business, Maezawa Industries Inc.)

** 宇都宮大学工学部応用化学科(Department of applied chemistry, Faculty of engineering, Utsunomiya University)

*** 宇都宮大学大学院工学研究科(Graduate school of engineering, Utsunomiya University)

用に加えて生物学的な浄化作用があり、溶解性有機物やアンモニア性窒素、亜硝酸性窒素等の酸化分解が期待できる技術である。現在、下水処理水量の大部分を占める標準活性汚泥法においては、年間を通じて高い硝化率を得ることは困難であり、二次処理水中には、比較的高い濃度（一般に $15 \sim 25 \text{ mg-N/l}$ 程度）のアンモニア性窒素が残留する。アンモニア性窒素は、魚毒性があり、 N-BOD の原因にもなる。したがって、アンモニア性窒素の酸化（硝化）は重要な課題であり、好気性ろ床が急速ろ過と比較して、特に効果的であると考えられる課題である^{10)~12)}。

好気性ろ床の一般的な構造は、粒径 $2 \sim 5 \text{ mm}$ 程度のアンスラサイト等のろ材を 2 m 程度充填するものである。ろ層部の洗浄を考慮すると、ろ層高さは 2 m 程度が限界であり、また、洗浄時のろ材流出を防止するために、トラフ高さをろ層表面から $2 \sim 2.5 \text{ m}$ 程度に設定する必要がある^{10), 11), 13)}。従って、比較的大きなスペースを占めているろ層上部は、浄化に活用されていない。硝化能力については、実験条件によりバラツキが見られるが、水温約 15°C において $80 \sim 90\%$ 以上の硝化率を得るためには、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 容積負荷を $0.4 \sim 1.0 \text{ kg-N/m}^3/\text{日}$ 程度とする報告が多い^{14)~17)}。この $\text{NH}_4\text{-N}$ 容積負荷の範囲を、原水の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度 20 mg/l 、ろ床高 2 m として、通水速度に換算すると、 $40 \sim 100 \text{ m}/\text{日}$ となる。急速ろ過と比較すると、通水速度は小さく、より広い設置スペースと多くの費用を必要とすることになる。従って、より硝化能力の高い好気性ろ床の開発が必要である。

このような背景から、筆者らは、2床式好気性ろ床の下水三次処理への適用について検討している。2床式好気性ろ床は、ろ床上部に空隙率の大きなプラスチック製接触材を充填（以下、接触酸化部と言う）し、これまで活用されていなかったろ層上部を有効に活用しようとするものである。なお、ろ層部にはアンスラサイト等のろ材を $1 \sim 1.5 \text{ m}$ 程度充填（以下、ろ過酸化部と言う）する。当初は、二次処理における効率的な有機物除去を目的として開発されたものであり¹⁸⁾、接触材には、ろ床の閉塞を考慮して、比表面積として $50 \sim 100 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 程度の比較的大きなサイズを用いていた。本研究は、この二次処理用の装置を三次処理に適した装置に発展させることを目的としている。ここでは、主に、パイロット規模の実験装置を用い、実際の下水二次処理水を原水として、接触材の種類およびその充填方法について、硝化能力の面から検討した。さらに、パイロットプラント実験結果を検証するために、同一時期でのろ床構造比較実験および人工下水を用いた基礎実験を実施した。なお、結果の一部はすでに発表している^{12), 19), 20)}。

2. 実験方法

2.1 実験場所および実験装置概要

主に家庭排水からなる下水を標準活性汚泥法によって処理しているA下水処理場内に実験装置を設置した。

実験装置は、パイロットプラント（内径 300 mm の2床式好気性ろ床、1系列）、ろ床構造比較実験装置（内径 150 mm の2床式好気性ろ床、2系列）および基礎実験装置（内径 80 mm 、4系列、接触酸化部 1 m のみ）から成る。

2.2 パイロットプラント実験

実際の下水二次処理水を原水として長期的な処理性を評価するために、パイロットプラント実験を行った。パイロットプラントの処理フローを図-1に示した。原水には、A下水処理場の最終沈殿池越流水を用い、前処理として 5 mm 目のスクリーンを通した。本システムにおいて、高い硝化能力を得るためには、充填する接触材が重要な条件となる。図

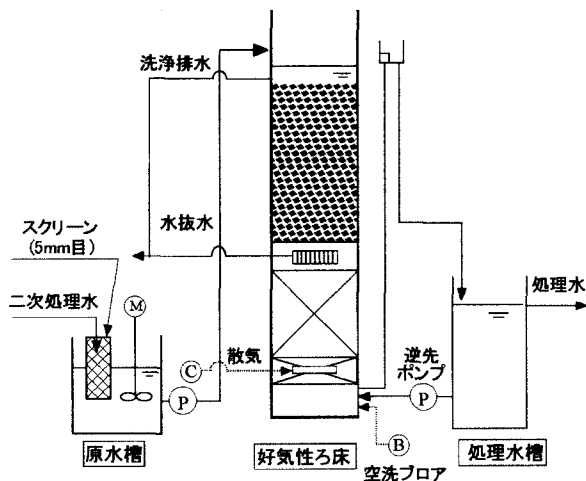
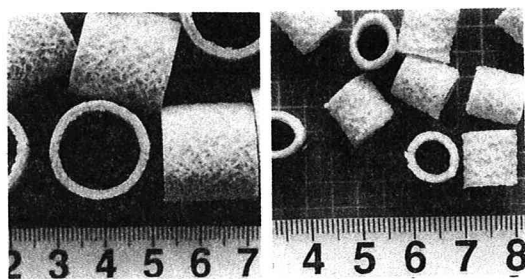


図-1 パイロットプラント処理フロー

図-1に示した。原水には、A下水処理場の最終沈殿池越流水を用い、前処理として 5 mm 目のスクリーンを通した。本システムにおいて、高い硝化能力を得るためには、充填する接触材が重要な条件となる。図

ー2 に、本実験に用いた接触材を示した。発泡ポリプロピレン製であり、中空円筒状で表面が凸凹していることから、サイズが大きい割には比表面積が大きく、硝化細菌が付着しやすいような細孔を多数有している。現在、この接触材のサイズは、4~20mm 程度まで、数種類が製作可能である。小さなサイズを用いると目詰まりの危険があることから、20mm(比表面積約 $500\text{m}^2/\text{m}^3$ 、以下 Type A と言う)と 10mm(比表面積約 $800\text{m}^2/\text{m}^3$ 、以下 Type B と言う)について検討した。また、充填方法については、接触材の上下をパンチングメタル等で支持する固定床と、下面のみ支持して散気により接触材が流動化する流動床について比較した。ろ過酸化部には、粒径 3~5mm のアンスラサイトを 1m 充填した。なお、活性汚泥法において、硝化能力を向上させるために、外径 4mm 程度の担体を見かけの容積充填率として 10~40%程度投入する方法が知られているが^{21)~23)}、本法は、好気性ろ床であること、接触材(担体)の充填率が高いこと(70~80%程度)等により、これらの処理法とは異なる。

好気性ろ床の構造を図-3に示した。実験当初は、接触酸化部を比表面積約 $500\text{m}^2/\text{m}^3$ の接触材(Type A)



<接触材 Type A>
固定床とした時に使用
外径 20mm×長 20mm
材質:発泡ポリプロピレン
比表面積:約 $500\text{m}^2/\text{m}^3$
比重:約 0.98

<接触材 Type B>
流動床とした時に使用
外径 10mm×長 10mm
材質:発泡ポリプロピレン
比表面積:約 $800\text{m}^2/\text{m}^3$
比重:約 0.98

<接触材 Type B
表面の電子顕微鏡
写真(SEM)>
表面が凸凹して、
多数の空孔を有する。
なお、接触材 Type A
の表面形状も同様で
ある。

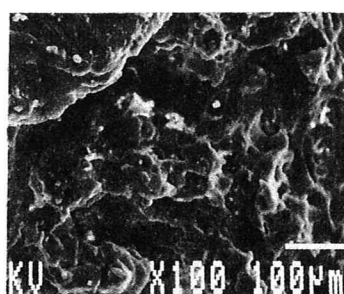


図-2 本実験に用いた接触材

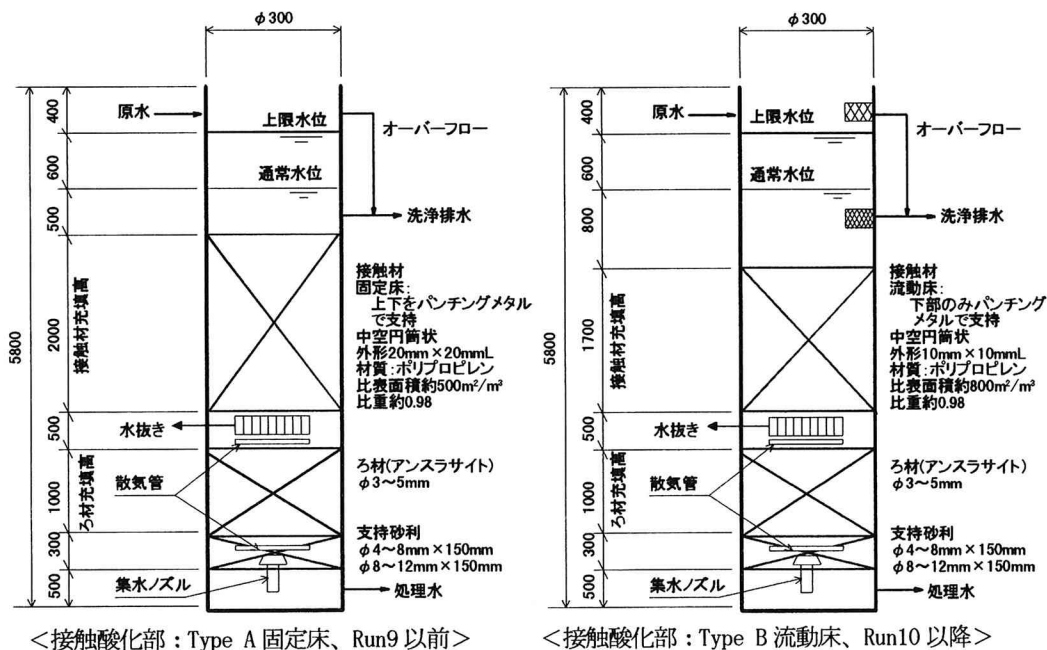


図-3 パイロットプラント好気性ろ床の構造

を用いた固定床とし、後に、比表面積約800m²/m³の接触材 (Type B)を用いた流動床に改造した。

好気性ろ床の洗浄は、原則として、タイマーにより1日に1回に設定した。洗浄方法は、図-4のとおりであり、特別な洗浄は行っていない。なお、接触材充填部は、ろ過酸化部と比較して洗浄が容易であるため、洗浄に伴う充填高さの制約はない。

表-1 に、パイロットプラントの運転状況を示した。Run1～Run9 は、接触酸化部が Type A の接触材を用いた固定床であり、Run10 以降は Type B の接触材を用いた流動床である。1997 年 7 月から Run1 の条件で馴致運転を開始し、Run9 終了まで連続した運転を行った。Run9 終了後、接触酸化部の改造を行った。この時、接触材は新しいもの(未使用品)と交換したが、ろ材(アンスラサイト)はそのまま使用した。Run10 と Run11 の間の様に大きく空いている期間があるが、表-1 に示した期間と同等の処理性であった等の理由で割愛した期間であり、運転は連続している。Run1～Run6 は、通水速度を 200m/日とし、散気速度を変化させた期間である。Run7 は、硝化率を上げるために、通水速度を 100m/日とした期間であり、Run8～Run9 は、通水速度を 150m/日とした期間である。Run10～Run13 は通水速度を 200m/日、散気速度を 300m/日とした期間であり、Run14 は硝化率を上げるために、通水速度を 120m/日とした期間である。また、Run8～Run10 および Run12～Run13 では、NH₄-N の負荷を高めるために、原水量に対して NH₄Cl を 5～15mg-N/l 程度添加した。Run10 および Run12～Run14 では、NaOH 溶液を添加して、接触酸化部での pH を 7.0～7.5 に制御した。

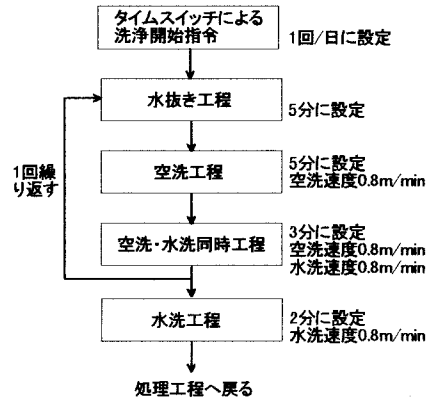


図-4 好気性ろ床の洗浄方法

表-1 パイロットプラントの運転状況(平均値)

Run No.	Run1	Run2	Run3	Run4	Run5	Run6	Run7	Run8	Run9	Run10	Run11	Run12	Run13	Run14
実験期間	開始年	1997	1997	1997	1997	1998	1998	1998	1998	1998	1999	1999	1999	2000
	開始月/日	9/2	10/2	11/4	12/4	1/20	2/26	3/19	5/28	6/30	10/6	4/13	11/2	12/21
	終了月/日	9/30	10/30	12/2	1/8	2/19	3/10	4/2	6/18	7/28	10/22	5/17	12/13	2/10
実験条件	接触酸化部構造	固定	固定	固定	固定	固定	固定	固定	固定	流動	流動	流動	流動	流動
	NH ₄ Clの添加	無	無	無	無	無	無	無	有	有	有	無	有	有
	pH制御	無	無	無	無	無	無	無	無	有	有	無	有	有
	通水速度(m/日)	200	200	200	200	200	200	100	150	150	200	200	200	200
	散気速度(m/日)	50	50	100	150	200	300	150	200	200	300	300	300	300
	BOD容積負荷(kg/m ³ -ろ床/日)	1.09	0.98	1.55	1.83	1.88	1.72	0.69	1.96	2.11	2.04	0.82	0.55	0.75
	ATU-BOD容積負荷(kg/m ³ -ろ床/日)	—	—	—	—	—	0.37	0.20	0.30	0.24	0.29	0.40	0.22	0.17
	NH ₄ -N容積負荷(kg/m ³ -ろ床/日)	0.35	0.65	0.99	0.64	0.71	0.97	0.40	0.90	1.31	1.44	1.53	2.01	1.80
水温	(°C)	23.3	20.2	18.7	16.0	15.2	15.9	16.8	20.9	22.3	21.1	18.7	20.0	16.8
	処理水	24.2	20.6	19.5	16.2	14.6	15.3	16.3	22.2	23.6	21.5	19.1	19.2	15.9
pH	(-)	6.6	6.9	7.0	6.9	6.8	6.9	7.0	6.7	6.9	6.7	7.0	6.7	6.8
	中間水	6.7	6.9	6.8	6.6	6.7	6.8	6.6	6.5	6.7	7.2	6.7	7.3	7.2
	処理水	6.4	6.6	6.6	6.4	6.5	6.5	6.4	6.3	6.3	6.6	6.5	6.8	6.8
DO	(mg/l)	4.1	4.3	4.5	4.6	4.9	5.1	5.5	4.8	4.2	4.0	3.3	3.9	4.0
	中間水	5.5	6.1	5.7	6.3	7.2	7.6	6.3	6.0	5.0	6.1	5.8	6.1	6.2
	処理水	1.9	1.1	2.8	3.3	4.7	4.6	4.2	5.1	1.6	2.1	3.3	1.9	3.2

2.3 ろ床構造比較実験

実際の下水二次処理水を原水とした実験では、時期により原水性状が変化するため、同一時期での比較実験が必要である。そこで、接触材の充填方法の違いによる硝化量の違いを評価する目的で、ろ床構造比較実験を行った。ろ床構造比較実験装置は、内径150mmの透明塩ビ製カラムであり、2系列とした。カラム径が小さいだけで、その他の構造はパイロットプラントと全く同じである。原水は、パイロットプラントの原水槽から供給し、ろ床の洗浄方法も同じである。接触材にはType Bを用い、1系は固定床、2系は流動床とした。

運転状況を表-2に示した。なお、Run1の約3ヶ月前から、Run1と同じ条件で馴致運転を行っている。接触

材充填高は、Run1では、1系、2系とも2000mmとしたが、Run2では2系の接触材充填高をパイロットプラントと同じく1700mmとした。通常の運転水位は、1系、2系とも接触材下部の支持板から2500mmの位置であった。この水位に対する2系の接触材充填率は、Run1で77% (展開率としては25%)、Run2では67% (展開率としては47%)である。下部は、パイロットプラントと同じくφ3～5mmのアンスラサイトを1000mm充填した。また、散気速度の硝化量への影響を評価するために、2000年3月23日 (Run2の期間)に、1時間毎に散気速度を変化させて、その時のNH₄-N濃度を測定した。短時間の内に散気速度を変化させることで、原水性状、水温、付着生物量等の影響を少なくできると考えたためである。

2.4 人工下水を用いた基礎実験

基礎実験装置は、人工下水を用いることにより、原水性状に影響されず、ろ床構造等の比較を行うことを目的としている。基礎実験装置の処理フローを図-5に示した。内径80mmのカラムが4系列あり、接触材の種類や充填方法を変えた実験が可能である。ここでは、Type Aの接触材とType Bの接触材の硝化量の違いを評価することを目的とした。接触材充填高は、共に1mとし、接触材の上下をパンチングメタルで支持して固定床とした。通常運転水位は接触材上面から300mmとした。なお、基礎実験カラムは接触材のみであり、ろ材は充填していない。

人工下水の組成を表-3に示した。水道水を受水タンクで受け混合タンクの水位により水道水移送ポンプをON-OFFさせた。また、水道水移送ラインには水道水中の残留塩素を除去する目的で活性炭処理塔を設けた。基質および微量金属の添加は、水道水移送ポンプの運転と連動して、それぞれの注入ポンプを運転する方式とした。微量金属の添加は、活性炭処理後でもCaおよびMgは充分に存在したことから、Feのみ添加した。通常運転時の原水 (混合タンク内) は、NH₄-N濃度約20mg/l、アルカリ度約200mg-CaCO₃/l、水温約20℃とした。馴致運転は、新しい接触材を充填して1999年12月から開始した。また、馴致期間および通常の運転条件は、通水速度100m/日、散気速度300m/日とした。従って、通常のNH₄-N容積負荷は約2kg-N/m³-ろ床/日であった。

このような馴致期間を経て、2000年5月11日から5月17日にかけて、接触材の種類 (Type AとType B) による硝化量の違いを評価する実験を行った。硝化量は、通水速度、散気速度、NH₄-N容積負荷の影響を受けると考えられる。また、原水のNH₄-N濃度が一定の場合、通水速度を増せば、NH₄-N容積負荷も増加することになり、どちらの影響によるのか区別できない。この実験では、ろ床内の混合状態の影響をみるために、NH₄-N容積負荷を一定にして通水速度を変化させる条件とした。即ち、通水速度を50、100、150、200、300m/日と変化させた時に、原水の

表-2 ろ床構造比較実験運転状況

Run No.	Run1	Run2
実験期間	2000/1/20 ～2/17	2000/2/24 ～3/30
通水速度(m/日)	200	200
散気速度(m/日)	300	300
BOD容積負荷	1系(固定床) 0.86	1.05
(kg-BOD/m ³ /日)	2系(流動床) 0.86	1.16
NH ₄ -N容積負荷	1系(固定床) 1.25	1.27
(kg-N/m ³ /日)	2系(流動床) 1.25	1.41
水温(℃)	16.3	16.6
1系(固定床) 中間水	14.8	16.2
2系(流動床) 中間水	14.9	16.0
pH	6.9	6.9
(-)	1系(固定床) 中間水	6.4
	処理水	6.4
	2系(流動床) 中間水	6.5
	処理水	6.5
DO (mg/l)	4.1	3.0
	1系(固定床) 中間水	6.8
	処理水	7.6
	2系(流動床) 中間水	6.5
	処理水	8.1

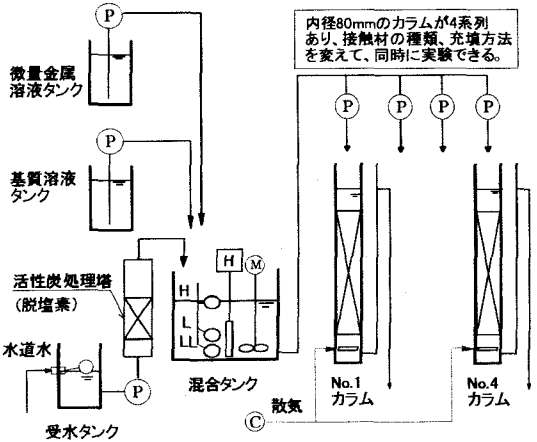


図-5 基礎実験装置処理フロー

表-3 人工下水の組成

基質	添加薬品名	溶液タンク内濃度	混合タンク内の濃度
	NH ₄ Cl	31g-NH ₄ Cl/l	約20mg-N/l
	NaHCO ₃	70g-NaHCO ₃ /l	約200mg-CaCO ₃ /l
	KH ₂ PO ₄	1.8g-KH ₂ PO ₄ /l	約2mg-P/l
微量金属	FeCl ₃ ・6H ₂ O	0.58g-FeCl ₃ ・6H ₂ O/l	約0.3mg-Fe/l

・水道水移送ポンプ：4l/minに設定

・基質および金属注入ポンプ：10ml/minに設定

NH₄-N 濃度は、それぞれ 40、20、13.3、10、6.7mg/l となるように設定した。なお、この時、表-3 に示した、NaHCO₃ および KH₂PO₄ の濃度は、NH₄-N 濃度に比例して変化し、微量元素の濃度は約 0.3mg-Fe/l で一定とした。また、実験終了後、接触材の付着生物量を測定した。

2.5 採水および分析方法

パイロットプラントおよびろ床構造比較実験においては、原則として、午前 11:00 頃におけるスポット採水であり、週に 1~2 回の頻度で分析した。分析方法は、原則として下水試験方法に準拠した。

接触材付着生物量の測定は、代表的と思われる接触材を、Type A では 5 個、Type B では 20 個程度採取し、60℃で 12 時間以上乾燥して生物付着状態での乾燥重量(a)を求め、次に、この乾燥した接触材の全量を 100ml ビーカーに移し、0.1N-NaOH 溶液 100ml を加えて、マグネチックスターラーで一晩攪拌した。その後、ブラシを用いて丁寧に付着物を剥離させ、蒸留水で良くすすぎ、60℃で 12 時間以上乾燥後、接触材の重量(b)を求め、この重量の差(a-b)を付着生物量とした。また、充填高当りの空塔容量に対する MLSS 濃度への換算は、採取した接触材の個数から、接触材 1 個当りの付着生物量を求め、接触材の充填量を Type A の場合には 95 個/l、Type B の場合には 750 個/l として、算出した。

硝化量の算定は、接触材あるいはろ材充填高当りの NH₄-N の減少量から求めた。たとえば、パイロットプラントでは、改造前は、ろ床全体を 3m、上部を 2m、下部を 1m として算出し、改造後は、ろ床全体を 2.7m、上部を 1.7m、下部を 1m として算出した。

3. 実験結果および考察

3.1 パイロットプラント実験

(1) SS 除去性について

SS 除去性を図-6 に示した。原水 SS 濃度が高い程、除去率は高くなった。原水の SS が 5mg/l 以上の条件では、概ね 50%以上の除去率が得られた。SS においては、接触酸化部の構造の違いによる除去性の違いはなかった。

(2) BOD 除去性について

図-7 に BOD の除去性を示したが、明確な傾向はない。原水の BOD 濃度が 20mg/l 以下の条件では、原水よりも処理水の方が高い場合も多い。図-8 に ATU-BOD の除去性を示した。原水 ATU-BOD が 5mg/l 以上の条件では、概ね 40%程度の除去率が得られた。図-9 に処理水の NH₄-N 濃度と処理水の N-BOD (BOD から ATU-BOD を引いた値)濃度の関係を示した。NH₄-N 濃度が高いほど N-BOD 濃度が高くなった。また、NH₄-N 濃度の低い領域でも、比較的高い N-BOD 濃度を示した。処理水 ATU-BOD は概ね 4mg/l 以下であり、かつ N-BOD は処理水の NH₄-N 濃度を 2~3mg/l 以下にすることにより、5mg/l 以下にすることが可能であるため、処理水の BOD 濃度を 10mg/l 以下にするためには、処理水の NH₄-N 濃度を 2~3mg/l 以下にする必要があ

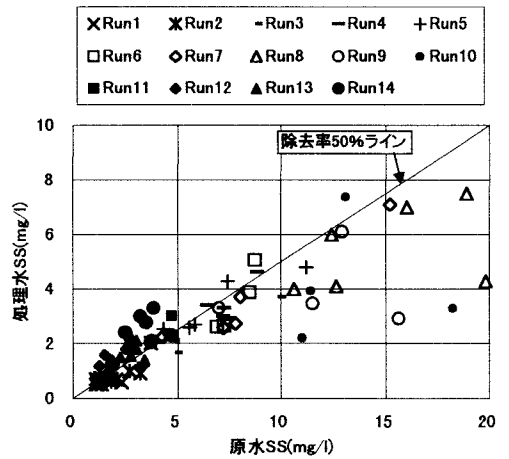


図-6 SS 除去性

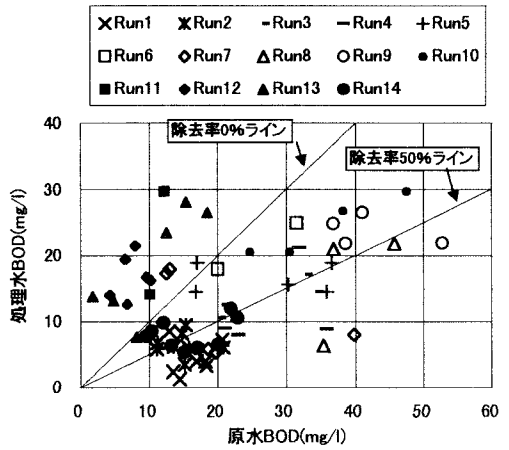


図-7 BOD の除去性

ると推定される。BOD においては、接触酸化部の構造の違いによる除去性の違いはなかった。

(3) 各態窒素濃度の垂直分布について

図-10 に、各態窒素濃度の垂直分布を示した。接触酸化部を Type B の接触材を用いた流動床とした場合であるが、接触酸化部での窒素濃度は、ほぼ一定であり、完全混合状態とみなせる。また、ろ過酸化部では、 $\text{NH}_4\text{-N}$ は漸次減少し、代わって $\text{NO}_3\text{-N}$ が増加している。押し出し流れに近い状態と言える。

(4) 硝化特性について

図-11 に各 Run 毎に区分して、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 容積負荷と硝化量の関係を示した。なお、ろ床全体(接触酸化部+ろ過酸化部)、接触酸化部、ろ過酸化部に分けて示した。ろ床全体および接触酸化部では、Type A 固定床(Run1~Run9)よりも Type B 流動床(Run10~Run14)の方が硝化量は高くなった。ろ過酸化部では、バラツキは大きいですが、差異は認められない(ろ過酸化部の構造は同じ)。また、この図に硝化率のラインを示したが、Type B 流動床としたことで、ろ床全体の $\text{NH}_4\text{-N}$ 容積負荷が $1.0\sim 1.2\text{kg-N/m}^3\text{-ろ床/日}$ までは、80%以上の硝化率を達成できることがわかる。

図-12 に、Run2~Run6 について、散気速度と硝化量の関係を示した。散気速度の増加にともなって、硝化量も増加したが、散気速度が $150\sim 300\text{m/日}$ の範囲では、硝化量の増加量は小さくなり、横這い傾向を示した。なお、Run2 から Run5 にかけては水温が低下した時期である。また、単床式の好気性ろ床では、散気速度の硝化量への影響について、既に多くの報告がある^{24)~26)}。散気速度の影響の度合いは、ろ材の種類や通水速度によって異なる様であるが、いずれの報告も、ある範囲までは、散気速度の増加にともなって硝化量も増加し、その後、硝化量は横這い傾向を示している。

図-13 に水温と硝化量の関係を示した。なお、散気速度の小さい Run1~Run3 および硝化率が高い(80%以上)データは、影響が大きいと考え除外した。アレニウス型の温度依存性とみなし、横軸は絶対温度の逆数に 10^5 倍した値をとり、縦軸には硝化量を $\text{g-N/m}^3\text{-ろ床/日}$ で表したときの自然対数をとった。相関係数は高くないが、直線関係が得られた。水温との関係においても、Type A 固定床よりも Type B 流動床の方が高い硝化量を示した。この直線関係を、水処理において通常用いられる $K_t=K_{20}\theta^{(t-20)}$ の形

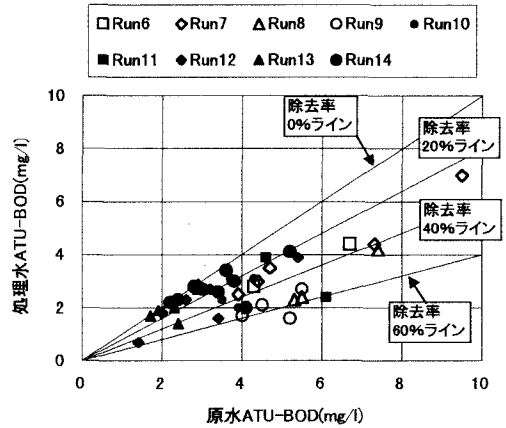


図-8 ATU-BOD の除去性

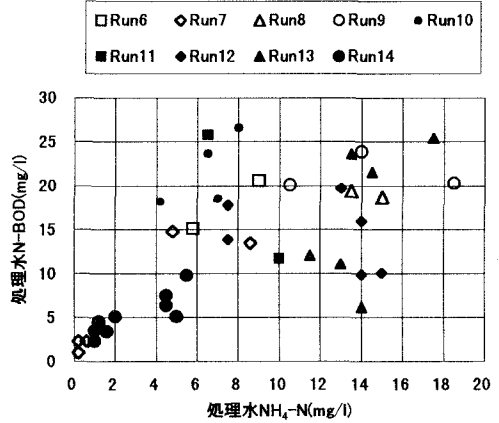


図-9 処理水の $\text{NH}_4\text{-N}$ と N-BOD の関係

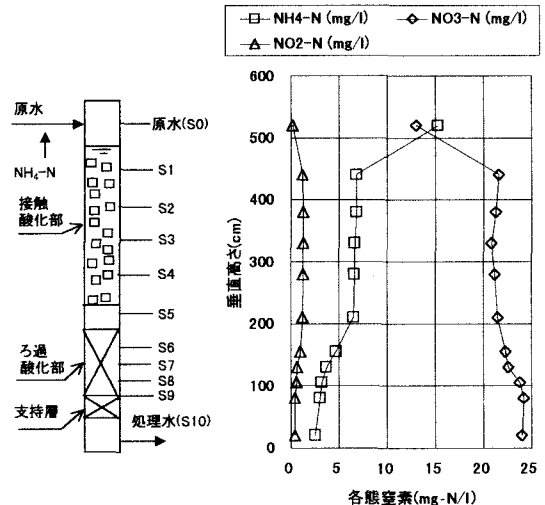


図-10 各態窒素濃度の垂直分布(1999/10/6)

(Type B, 流動床, 通水速度 200m/日 , 散気速度 200m/日 , 水温 23.7°C)

で表すと、Type A 固定床では、 $K_{20}=22.5(\text{g-N/m}^3\text{-ろ床/H})$ 、 $\theta=1.026$ 、Type B 流動床では、 $K_{20}=36.1(\text{g-N/m}^3\text{-ろ床/H})$ 、 $\theta=1.036$ であった。

pHは、硝化量への重要な影響因子である。好気性ろ床における、pHの影響に関する報告は幾つかあるが、影響の度合いには隔たりがある。例えば、藤田ら²⁴⁾は、pH6.2~8.5の範囲で、明かな影響は認められなかったとしているし、Villaverdeら²⁷⁾は、アンモニアの酸化において、至適pHは8付近であり、pH6.5では、硝化量は約1/2に低下することを示している。また、滝沢ら²⁸⁾は、好気性ろ床は、浮遊式反応槽よりも高いアルカリ度を維持する必要があると指摘している。本実験においては、 NH_4Cl を添加し、かつ硝化率の高い実験期間で、pHが6前後まで低下して、硝化量への影響が認められたことがあり(ここでは、この実験期間は省いている)、表-1に示したとおり、pH低下が予測されたRun10およびRun12~Run14では、NaOH溶液を添加して、接触酸化部でのpHを7.0~7.5に制御した。このことから、表-1に示した全実験期間(接触酸化部のpHは概ね6.5以上)において、pHの明かな影響は認められなかった。

(5) 低水温期における処理性比較

低水温期の処理性について、表-4~表-7に示した。SSおよびATU-BODについては、原水濃度が2~10mg/lと低いこともあり、処理水では1~5mg/lとなり、何れのRunでも良好な処理が行われた。しかし、通水速度を200m/日とした、Run6およびRun13では、40~60%の硝化率となり、処理水中に5~15mg-N/l程度の $\text{NH}_4\text{-N}$ が残留した。このため、N-BODが高くなり、BODは15~25mg/lと高い値になった。Run7およびRun14は高い硝化率を維持することにより、N-BODを低く抑ええることを目的に、通水速度を下げた(Run7では100m/日、Run14では120m/日)実験期間である。この結果、Run6とRun7およびRun13とRun14を比較する

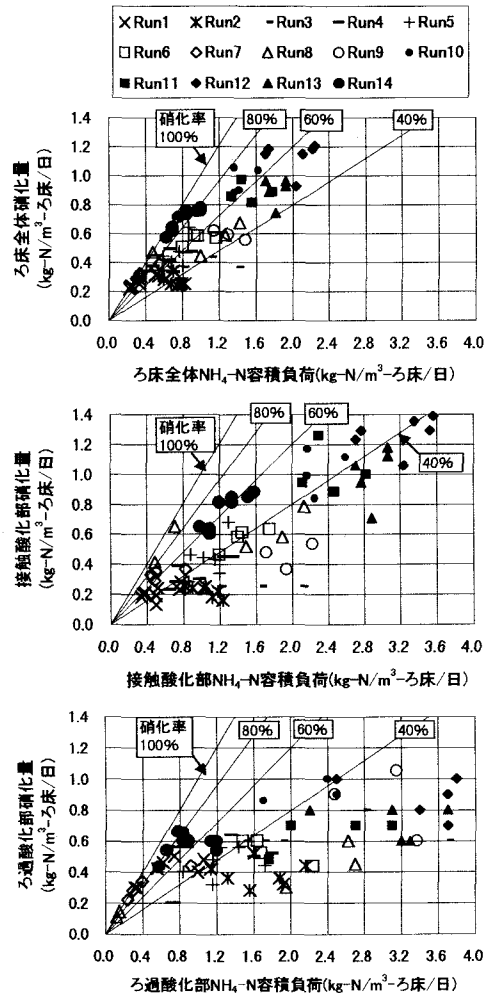


図-11 $\text{NH}_4\text{-N}$ 容積負荷と硝化量の関係

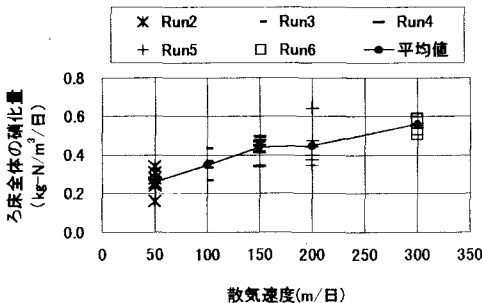


図-12 散気速度と硝化量の関係
(通水速度200m/日、接触酸化部: Type A 固定床)

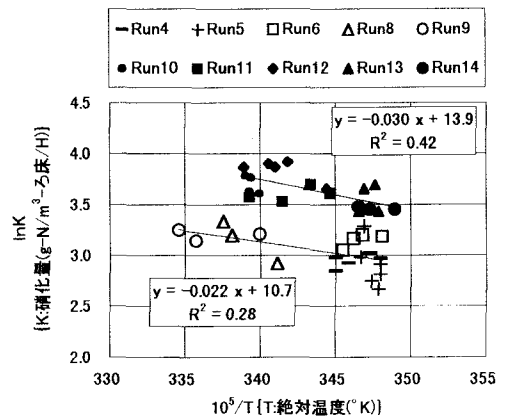


図-13 水温と硝化量の関係

と、硝化率が上昇し、BOD 除去率も上昇している。

表－4 Run6 平均水質

(TypeA 固定床, 通水速度 200m/日, 散気速度 300m/日, 水温 15.3℃)

		原水	中間水	処理水	除去率 (%)
SS	mg/l	7.9		3.5	54.9
BOD	mg/l	25.8		21.5	16.7
ATU-BOD	mg/l	5.5		3.6	34.5
NH ₄ -N	mg/l	14.5	8.8	6.1	57.9
NO ₃ -N	mg/l	1.4	8.7	12.5	
NO ₂ -N	mg/l	1.2	0.5	0.4	

表－6 Run13 平均水質

(TypeB 流動床, 通水速度 200m/日, 散気速度 300m/日, 水温 15.9℃)

		原水	中間水	処理水	除去率 (%)
SS	mg/l	2.7		1.7	36.5
BOD	mg/l	10.1		18.8	-86.1
ATU-BOD	mg/l	2.4		2.1	10.6
NH ₄ -N	mg/l	24.4	16.4	13.4	44.9
NO ₃ -N	mg/l	3.1	9.2	13.5	
NO ₂ -N	mg/l	0.8	1.1	0.5	

表－5 Run7 平均水質

(TypeA 固定床, 通水速度 100m/日, 散気速度 150m/日, 水温 16.3℃)

		原水	中間水	処理水	除去率 (%)
SS	mg/l	8.5		3.7	56.5
BOD	mg/l	20.6		10.9	47.2
ATU-BOD	mg/l	6.0		3.6	40.3
NH ₄ -N	mg/l	12.0	5.9	2.9	75.9
NO ₃ -N	mg/l	1.3	9.9	14.4	
NO ₂ -N	mg/l	2.8	0.7	0.2	

表－7 Run14 平均水質

(TypeB 固定床, 通水速度 120m/日, 散気速度 300m/日, 水温 15.2℃)

		原水	中間水	処理水	除去率 (%)
SS	mg/l	3.2		2.3	27.4
BOD	mg/l	15.8		8.1	48.6
ATU-BOD	mg/l	3.3		2.8	16.6
NH ₄ -N	mg/l	18.8	7.7	2.9	84.7
NO ₃ -N	mg/l	2.3	13.0	18.0	
NO ₂ -N	mg/l	0.7	1.1	0.4	

これらの表から硝化量を算出すると、Run6 は 0.56、Run7 は 0.30、Run13 は 0.81、Run14 は 0.71kg-N/m³-ろ床/日となり、接触酸化部を Type B 流動床とした Run13、Run14 の硝化量が大きくなっている。Run6 と Run13 を比較すると、通水速度、散気速度、水温、硝化率は同等であるが、原水 NH₄-N 濃度の増加に伴い負荷が増加したことにより、Run13 は Run6 に対して硝化量では約 1.4 倍となっている。通水速度を下げて硝化率を高く維持した Run7 と Run14 を比較すると、散気速度の違いはあるが、Run14 の硝化量は Run7 の約 2.4 倍となっている。設計的には、通水速度は、好気性ろ床の大きさだけではなく、その付帯設備(洗浄用水槽、逆洗ポンプ、空洗ブロワ等)の大きさに直結する重要な意味をもつ。また、散気速度は電力費に直結するものであり、処理水量当たりの電力費という意味では、散気倍率(散気量を通水量で除した値)が重要となる。これらの点を考慮すると、低水温期において高い硝化量を示した、Type B 流動床は、Type A 固定床と比較して、非常に優れていると言える。また、Run14 において、ほぼ満足できる処理性が得られたこと、および、本システムでは、接触酸化部の高さを増すことによって、硝化能力の向上が図れることを考慮すると、原水の NH₄-N 濃度 20mg/l、最低水温 15℃の条件で、通水速度を 120m/日とすることが可能と考えられ、従来型の好気性ろ床と比較して、高速での処理が可能になったと言える。

3.2 ろ床構造比較実験

平均水質を表－8、表－9 に示した。固定床と流動床の処理性を比較すると、すべての分析項目において、ほぼ同等と考えられた。図－14 に、NH₄-N 容積負荷と硝化量の関係を示した。ろ床全体でみると流動床の方が少し硝化量が高い結果となったが、構造の異なる接触酸化部では同等であり、むしろ、構造が同じであるろ過酸化部において高い結果であった。また、流動床での Run1 と Run2 を比較すると、ほぼ同等の硝化量であり、接触材充填率による差は認められなかった。図－15 に散気速度と硝化量およびその時の DO の関係を

表－8 ろ床構造比較実験 Run1 平均水質

		原水	固定床		流動床		固定床 除去率	流動床 除去率
			中間水	処理水	中間水	処理水	(%)	(%)
SS	mg/l	3.1		2.1		2.4	33.4	23.0
BOD	mg/l	12.9		18.1		18.4	-40.4	-42.7
ATU-BOD	mg/l	3.0	3.5	2.4	3.0	2.4	21.8	21.8
NH ₄ -N	mg/l	18.8	10.7	7.3	10.6	6.5	61.2	65.3
NO ₃ -N	mg/l	2.8	10.5	13.7	8.6	14.6		
NO ₂ -N	mg/l	0.6	0.3	0.3	0.3	0.4		

表－9 ろ床構造比較実験 Run2 平均水質

		原水	固定床		流動床		固定床 除去率	流動床 除去率
			中間水	処理水	中間水	処理水	(%)	(%)
SS	mg/l	4.0		1.9		1.9	51.1	52.2
BOD	mg/l	15.7		17.1		20.1	-9.3	-28.2
ATU-BOD	mg/l	3.7	3.9	2.8	3.9	2.7	23.8	26.6
NH ₄ -N	mg/l	19.1	11.5	7.0	12.2	6.8	63.2	64.5
NO ₃ -N	mg/l	2.0	10.1	14.0	8.7	14.1		
NO ₂ -N	mg/l	0.6	0.6	0.5	0.5	0.6		

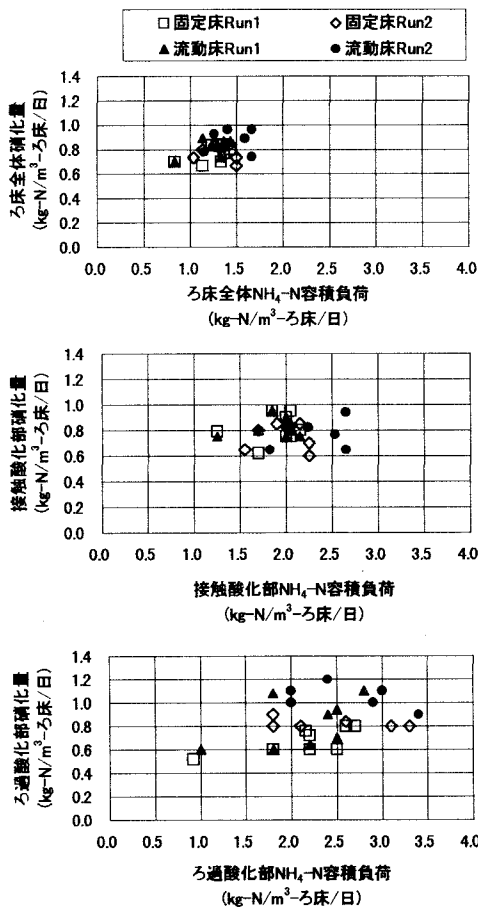


図-14 $\text{NH}_4\text{-N}$ 容積負荷と硝化量(ろ床構造比較実験)

示した。散気速度を増加させると硝化量も増加した。DO濃度は、散気速度 50m/日のとき約 2.5mg/l、100m/日のとき約 4mg/l であり、DO の影響も考えられるが、他は、5mg/l 以上であり、主には、攪拌力の増加が硝化量の増加に繋がったと考えられる。この図からも、固定床と流動床による硝化量の差は認められない。また、この時の接触材の付着生物量は、固定床、流動床ともに、充填高当りの空塔容量に対する MLSS 濃度に換算して約 4000mg/l であった。

以上のことから、パイロットプラントにおける硝化能力の改善は、充填方法による効果ではなく、接触材の種類、即ち、比表面積が増加したことによる効果であったと考えられる。

3.3 人工下水を用いた基礎実験

結果を図-16 に示した。比表面積の大きい Type B の方が硝化量は大きくなった。また、この実験では、通水速度および散気速度を変化させた。これまでと同様、散気速度の増加とともに硝化量も増加した。しか

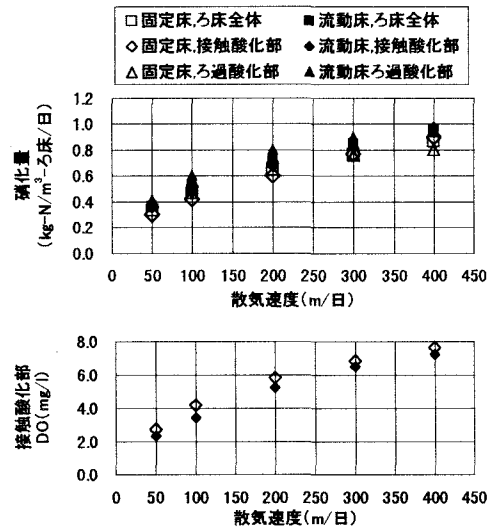


図-15 散気速度と硝化量および DO

(ろ床構造比較実験、2000年3月23日、通水速度 200m/日、水温 15.5℃、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 容積負荷 1.5kg-N/m³-ろ床/日)

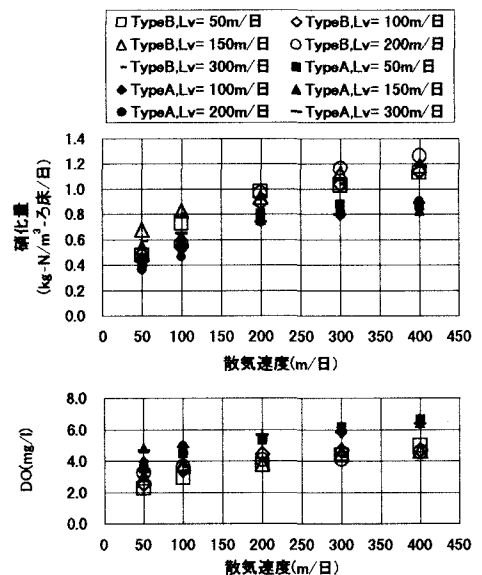


図-16 接触材種類比較(基礎実験装置)

(2000年5月、水温 20℃、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 容積負荷約 2kg-N/m³-ろ床/日)

し、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 容積負荷を約 $2\text{kg-N/m}^3\text{-ろ床/日}$ で一定としたことから、通水速度の影響は少なかった。また、実験終了時の接触材の付着生物量は、充填高当りの空塔容量に対する MLSS 濃度に換算して、Type A は 2300mg/l 、Type B は 3900mg/l あった。Type A を基準にして、Type B は、比表面積で約 1.6 倍、硝化量で約 1.4 倍、付着生物量で約 1.7 倍であった。

以上のことから、硝化量は、接触材の種類、即ち比表面積による影響が大きいことが確認され、パイロットプラントでの硝化能力の改善は、接触材の比表面積が増加したことによる効果と推定された。

4. まとめ

下水三次処理に適した硝化能力の高い、2 床式好気性ろ床(上部にプラスチック製接触材、下部にアンスラサイトを充填した下向流方式)の開発を目的として、実際の下水二次処理水を原水としたパイロット規模の実験を行った。特に、接触材の種類およびその充填方法の違いによる硝化量の違いについて検討した。初めの実験期間(Run1~Run9)では接触酸化部の構造を比表面積約 $500\text{m}^2/\text{m}^3$ の接触材 (Type A) を用いて固定床とし、次の実験期間(Run10~Run14)では比表面積約 $800\text{m}^2/\text{m}^3$ の接触材 (Type B) を用いて散気による流動床とした。そして、それぞれの処理性を比較した。SS、ATU-BOD の除去性は同等であったが、硝化量においては、後者の方が高い値を示した。

また、パイロットプラントの結果を検証するために、ろ床構造比較実験、および基礎実験を行った。ろ床構造比較実験では、接触酸化部に Type B の接触材を充填し、1 系は固定床、2 系は流動床として、パイロットプラントと同じ原水を用いて、同一時期における処理性比較を行った。その結果、1 系と 2 系は同等の処理性であった。また、基礎実験においては、Type A の接触材と Type B の接触材による硝化量の違いを評価するために、接触材のみ 1m 充填した固定床カラムを用い、人工下水を原水として比較した。その結果、比表面積の増加に対応して、付着生物量および硝化量が増加した。これらの実験から、パイロットプラントにおける硝化能力の向上は、接触材の充填方法(固定床と流動床)によるものではなく、接触材の種類、即ち、比表面積が増加したことによる効果であったと考えられた。

パイロットプラント実験によって得られた主な結果をまとめると、以下のとおりである。

- 1) 実施時期は異なるが、接触酸化部を、比表面積約 $500\text{m}^2/\text{m}^3$ の接触材 (Type A) を用いて固定床とした場合と、比表面積約 $800\text{m}^2/\text{m}^3$ の接触材 (Type B) を用い散気による流動床とした場合の処理性を比較した。SS、ATU-BOD の除去性は同等であったが、硝化量においては、後者の方が高い値を示した。
- 2) 処理水 ATU-BOD は概ね 4mg/l 以下であり、かつ N-BOD は処理水の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を $2\sim 3\text{mg/l}$ 以下にすることにより、 5mg/l 以下にすることが可能であった。したがって、処理水の BOD 濃度を 10mg/l 以下とするためには、処理水の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度を $2\sim 3\text{mg/l}$ 以下にする必要があると推定された。
- 3) Type B 流動床における各態窒素濃度のろ床内垂直分布の測定結果から、接触酸化部は完全混合に近い状態であり、ろ過酸化部は押し出し流れに近い状態と考えられた。
- 4) 硝化量は、通水速度、散気速度、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 容積負荷、水温の影響を受けた。そして、これらの値が大きい程、硝化量は大きくなった。また、本実験の範囲(接触酸化部の pH が概ね 6.5 以上 7.5 以下)では pH による硝化量への明らかな影響は認められなかった。
- 5) 散気速度 $150\sim 300\text{m/日}$ 、硝化率が $40\sim 80\%$ 程度における硝化量の温度依存性について検討した。 $t^\circ\text{C}$ における硝化量は、 $K_t = K_{20} \theta^{(t-20)}$ の形で表すと、固定床では、 K_{20} (20°C における硝化量) $= 22.5 (\text{g-N/m}^3\text{-ろ床/H})$ 、 $\theta = 1.026$ 、流動床では、 $K_{20} = 36.1 (\text{g-N/m}^3\text{-ろ床/H})$ 、 $\theta = 1.036$ であった。
- 6) 低水温期(約 15°C)の処理性について、Type A 固定床と Type B 流動床とを比較した。SS、ATU-BOD の除去性は同等であったが、硝化量においては、後者の方が高い値を示した。後者において、通水速度 120m/

日、散気速度 300m/日の条件で、良好な処理性を確認した(Run14)。このことから、本システムを Type B 流動床とすることで、従来の単床式好気性ろ床と比較しても、より高速での処理が可能となり、省スペース化、省エネルギー化が図れるものと考えられた。

最後に、本研究を行うにあたって、多大なご支援を頂いた、元宇都宮大学教授栗山光央先生に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 五井正季, 古山 諭, 北谷道則: “文献レビュー, 高度処理”, 下水道協会誌, Vol.35, No.430, pp.79-93(1998)
- 2) 山本 聡, 佐藤研三, 五藤久貴: “文献レビュー, 再生水利用の最前線”, 下水道協会誌, Vol.35, No.434, pp.57-70(1998)
- 3) 森岡泰裕: “[特集]再生水技術の最前線, わが国の水資源と処理水再利用”, 下水道協会誌, Vol.35, No.434, pp.8-13(1998)
- 4) 小越眞佐司: “[特集]再生水技術の最前線, 処理水再利用の現状と再生水技術”, 下水道協会誌, Vol.35, No.434, pp.14-17(1998)
- 5) 土木研究所資料: “下水道高度処理計画及び高度処理導入プログラムに関する研究報告書”(1988)
- 6) 日本下水道協会: “アクアリサイクルプラン策定の手引き(案)”(1994)
- 7) 日本下水道協会: “高度処理施設設計マニュアル(案)”(1994)
- 8) 栗林宗人編: “下水道実務講座 7, 高度処理と再利用”(1989, 山海堂)
- 9) 関根幸雄, 内海精司, 関 健次: “急速砂ろ過施設の性能と生物反応”, 第 25 回下水道研究発表会講演集, pp.385-387(1988)
- 10) 芳倉太郎: “生物膜法の上水・下水処理への適用”, 水処理技術, Vol.38, No.7, pp.1-10(1997)
- 11) 藤田賢二編著: “急速濾過・生物濾過・膜濾過”(1994, 技報堂出版)
- 12) 石川 進, 皆方 護, 馬場郁子: “下水三次処理用好気性ろ床の処理特性”, 第 6 回生物利用新技術研究シンポジウム論文集, pp.152-156(1998)
- 13) 竹島 正: “[特集]再生水技術の最前線, 有明処理場における下水処理から再生水供給までの施設概要と維持管理技術について”, 下水道協会誌, Vol.35, No.434, pp.18-37(1998)
- 14) 清水紀嗣, 志村公久: “生物膜ろ過法による硝化・脱窒に関する調査(その 5)”, 平成 6 年度東京都下水道局技術調査年報, pp.165-172 (1995)
- 15) 志村公久: “東京都の新技術紹介<第 8 回>高度処理のための生物膜ろ過法の開発”, 月刊下水道, Vol.17, No.10(1994)
- 16) 府中裕一: “生物膜ろ過法における下水の高度処理”, 環境技術, Vol.19, No.5, pp.302-305(1990)
- 17) 青木正信, 石井宏和, 坂田 敦: “好気性ろ床法による二次処理水中のアンモニアの硝化”, 第 26 回下水道研究発表会講演集, pp.472-474(1989)
- 18) 宗宮 功, 小野芳朗, 高岡伸幸, 中川博夫: “接触酸化-生物ろ過法による有機物除去特性に関する研究(1)”, 下水道協会誌, Vol.22, No.252, pp.60-65(1985)
- 19) 馬場郁子, 石川 進, 皆方 護: “三次処理用好気性ろ床の硝化特性について”, 第 36 回下水道研究発表会講演集, pp.583-585(1999)
- 20) 馬場郁子, 石川 進, 佐藤 敏, 柿井一男: “2 床式好気性ろ床による下水の三次処理”, 第 37 回下水道研究発表会講演集, pp.557-559(2000)
- 21) 高橋正宏, 石井正敏, 局 俊明: “担体投入型生物処理システムの処理性能に関する一考察”, 下水道協会誌論文集, Vol.31, No.379, pp.49-59(1994)
- 22) 局 俊明, 高橋正宏, 石井正敏: “担体投入型生物処理システムの設計・制御因子について”, 下水道協会誌論文集, Vol.32, No.383, pp.50-63(1995)
- 23) 三木 理, 加藤敏朗, 嘉森裕史, 坂田守生: “担体投入法を用いた高濃度窒素含有下水からの窒素除去の効率化に関する検討事例”, 下水道協会誌, Vol.36, No.438, pp.137-147 (1999)
- 24) 藤田賢二, 室石泰弘, カンサカル, B.R.: “曝気ろ過池によるアンモニア態窒素の硝化”, 水道協会雑誌, Vol.57, No.635, pp.2-15(1987)
- 25) 滝沢 智, 藤田賢二: “曝気ろ過池による酸素供給機構”, 水道協会雑誌, Vol.57, No.635, pp.2-15(1988)
- 26) J.-G. Peladan, H. Lemmel and R. Pujol: “High nitrification rate with upflow biofiltration”, Wat. Sci. Tech. Vol.34, No.1-2, pp.347-353 (1996)
- 27) S. Villaverde, P.A. García-Encina, F.Fdz. Polanco: “Influence of pH over nitrifying biofilm activity in submerged biofilters”, Wat. Sci. Tech. Vol.31, No.5, pp.1181-1186 (1997)
- 28) 滝沢 智, 桃井清至, 藤田賢二: “曝気濾過池における硝化反応に及ぼす pH およびアルカリ度の影響”, 第 27 回下水道研究発表会講演集, pp.375-377(1990)