生物膜ろ過法における下水の高度処理 —BOD除去と $\text{NH}_4\text{-N}$ の硝化の競合関係—

府 中 裕 一 *

1. はじめに

好気性ろ床法とも呼ばれる生物膜ろ過法は生物処理とろ過とを同時に行うものであり、約10年前に活性汚泥法に代わる下水処理方法として開発されたものである¹⁾。現在では多くの工場廃水処理にも適用され²⁾、様々な処理特性が明らかにされている^{3), 4)}。

なかでも、下水の高度処理に関しては高負荷処理が可能であるばかりではなく、送気量が極めて節約できるため、本法の特長を最大限に発揮でき、今後の発展が期待できる。そこで、下水2次処理水中のSS・BODの除去や $\text{NH}_4\text{-N}$ の硝化について若干の検討を試みたので報告する。

2. 実験方法と装置

実験に供した原水は団地下水処理場の2次処理水であり、フローシートを図-1に示す。原水は処理槽の上部に導かれ、ろ材層を上から下に流れる。ろ材層はエアレーションによって好気状態が保たれている。ろ材層を流下する間に原水中の汚濁成分は浄化され、処理水となる。

図-1 Flow sheet

処理を長時間継続すると、ろ材層の目詰まりが生じるため逆洗する。

水質の分析は濁度と色度については JIS K0101, その他は JIS K0102 にしたがった。また、BODについては硝化の影響を除く目的でアリルチオ尿素を添加して測定した。次に実験装置の主な仕様を表1に示す。ろ材としては品質が安定していて、比較的安価なアンスラサイトを使用した。アンスラサイトの粒径は有効径3.0mmである。

表1 Dimensions of pilot plant

Item	Dimensions
Reactor	0.4m ϕ $\times$ 4.5mH
Granular media	Anthracite 1.7mH (0.21m ³)
Treated water tank	Effective volume 0.5m ³
Backwash wastewater tank	Effective volume 0.5m ³

3. 実験結果

3.1 SS・BOD除去実験

1) 処理条件と処理結果

実験結果を表2に示す。通常の砂ろ過とほぼ同様なLV（ろ過速度）120m/dで処理したところ、BOD負荷は0.7~2.6kg/(m³・d)となった。SSとBODはともに80%以上の除去率が得られ、処理水水質としてSSは3mg/l, BODは4mg/l程度になっている。さらに、透視度は常に50cm以上であり、清澄な処理水になっている。このときの送気量は処理水量あたり0.5倍であり、BOD除去量[kg]あたりに換算すると15Nm³程度になる。

次に、各水質の除去特性を明らかにするため、ろ材層厚にしたがって数点採取し、分析した結果を図-2に示す。SS・BOD・COD_{Mn}とも同じようにろ材層厚が増すにつれて、徐々に減少している。

* 奈良原総合研究所
Yuhichi FUCHU

表2 Experimental results (SS・BOD removal)

Condition of treatment		120		
LV	[m/d]	0.7 ~ 2.6 (1.6)		
BOD loading	[kg/(m³・d)]			
Sampling point		Influent	Effluent	Removal efficiency [%]
Condition of water quality				
Temperature	[°C]	16 ~ 18 (17)	15 ~ 18 (17)	
pH	[—]	6.8 ~ 7.4 (7.1)	6.2 ~ 6.7 (6.5)	
Transparency	[cm]	11 ~ 35 (18)	> 50	
Turbidity	[NTU]	15 ~ 70 (49)	2 ~ 8 (4)	(92)
Color	[unit]	30 ~ 80 (57)	25 ~ 50 (38)	(33)
SS	[mg/ℓ]	11 ~ 40 (25)	tr. ~ 6 (3)	(88)
BOD	[mg/ℓ]	10 ~ 37 (22)	2 ~ 10 (4)	(82)
COD _{Mn}	[mg/ℓ]	16 ~ 38 (27)	10 ~ 20 (14)	(48)

() is average

図-2 Relation between media layer and SS・COD_{MN}・BOD

2) BOD除去特性

BODとS-BOD（溶解性BOD）について反応時間と残存比（C/C₀）の関係を求めた。片対数グラフで表したものが図-3である。両者の反応速度式は[1]式に示すような1次式に近似できる。

$$\ell \ln C/C_0 = -Kt \dots\dots\dots [1]$$

ここで、C：t分後の処理水濃度 [mg/ℓ]
C₀：原水濃度 [mg/ℓ]
t：反応時間 [min]
K：反応速度定数 [1/min]

BODとS-BODの反応速度定数を図-3からもとめると、それぞれ0.21, 0.10 1/minとなり、BODはS-BODの2倍の値になっている。

3. 2 NH₄-Nの硝化

1) 処理条件と処理結果

SS・BOD除去はLV120m/dで十分に達成で

図-3 Relation between reaction time and BOD, S-BOD removal

きるが、NH₄-Nの硝化をほぼ完全に行うためにはLVを下げる必要がある。LV37m/dで実験した結果を表3に示す。

NH₄-N負荷は0.39~0.53kg/(m³・d)であり、BOD負荷は0.32~0.70kg/(m³・d)である。また、送気量は処理水量の2.5倍とし、硝化によるpHの低下を防ぐ目的で、NaOHを13~27mg/ℓ添加した。水温10~15℃の範囲において、原水NH₄-Nの平均値は21mg/ℓであり、処理水NH₄-Nの平均値は0.6mg/ℓとなり、100%近い硝化率が得られている。処理水中のNO_x-Nの主成分はNO₃-Nであり、硝酸型硝化になっている。

2) 硝化特性

LV24~49m/dに変化させてNH₄-N負荷とNH₄-N除去率の関係を求めた。結果が図-4である。水温10~15℃、BOD負荷0.32~1.4kg/(m³・d)の条件において、NH₄-N負荷0.5kg/(m³・d)以下で90%以上の除去率が得られる。

しかし、NH₄-N負荷が0.5kg/(m³・d)以上では

表 3 Experimental results (nitrification)

Condition of treatment		37		
LV	[m/d]			
NH ₄ -N loading	[kg/(m ³ ·d)]	0.39~0.53 (0.45)		
BOD loading	[kg/(m ³ ·d)]	0.32~0.70 (0.64)		
Sampling point		Influent	Effluent	Removal efficiency [%]
Condition of water quality				
Temperature	[°C]	12 ~ 15 (14)	10 ~ 14 (12)	
pH	[-]	7.8 ~ 8.1 (7.9)	6.5 ~ 7.4 (7.0)	
Transparency	[cm]	10 ~ 28 (17)	> 100	
Turbidity	[NTU]	20 ~ 70 (49)	0.5 ~ 2 (1)	(98)
Color	[unit]	45 ~ 80 (60)	30 ~ 50 (33)	(45)
SS	[mg/l]	8 ~ 34 (19)	tr. ~ 1.5 (<1)	(>95)
BOD	[mg/l]	15 ~ 33 (26)	1 ~ 4 (2)	(92)
COD _{Mn}	[mg/l]	21 ~ 40 (31)	9.0 ~ 13 (11)	(64)
NH ₄ -N	[mg/l]	18 ~ 26 (21)	<0.1 ~ 2.0 (0.6)	(97)

() is average

図-4 Relation between NH₄-N loading and NH₄-N removal efficiency

NH₄-N除去率のパラッキが大きくなる。これはBOD負荷の増減に影響されているものと思われる。そこで、BOD除去とNH₄-Nの硝化の競合関係を明らかにする必要がある。

ろ材層内における両者の反応形態を反応時間ごとに示したのが図-5である。BOD除去については先の実験結果に基づいて1次式にしたがうものとした。NH₄-Nについては1次式より0次式[2]によく近似できる。

$$C_0 - C = Kt \quad \dots\dots\dots [2]$$

反応初期においてはBODが主に除去され、8分後には4.8mg/lまで低減される。この間の反応速度定数は0.22 1/minであり、SS・BOD除去実験で得られた値とよく一致している。8分以上になるとBODの除

図-5 Relation between reaction time and BOD, NH₄-N removal

去はゆるやかになり、36分後で1.4mg/lになる。反応速度定数は0.05 1/minであり、初期の1/4から1/5である。

一方、NH₄-Nは反応初期においてはほとんど変化しない。ところが、BODが5mg/l以下になった8分以降において硝化が急速に始まる。8分から26分までの反応速度定数を求めると、0.92mg/(l·min)である。26分以降になると、NH₄-N濃度が低下するため反応速度も低下している。

以上から、NH₄-Nの硝化はBOD除去がほぼ終了してから生じることがわかる。したがって、BOD負荷量の多少によってNH₄-Nの硝化が大きく影響されることになる。ちなみに、8分から26分までの反応速度式[2']と反応時間(t, min)や硝化速度(Rv, kg/(m³·d))の定義式[3], [4]から、BOD負荷量が零のときの硝化速度を予測すると、0.66

kg/(m³・d)になる.

$$C_o - C = 0.92 \text{ t} \dots\dots\dots [2']$$

$$t = 1440 (\varepsilon \cdot V / Q) \dots\dots\dots [3]$$

$$R_v = (C_o - C) \cdot Q \cdot 10^{-3} / V \dots\dots\dots [4]$$

ここで, ε : ろ材層の空隙比 (0.5)

V : 反応容積 [m³]

Q : 処理水量 [m³/d]

3) 総括容量係数と酸素利用効率

原水と処理水の水質分析のほかにろ材層内の水温とDOを測定して総括容量係数 (KLa) と酸素利用効率 (η) を求めた. 水質分析結果を表4に, KLaと η を表5に示す. 酸素消費量はBOD除去量の1倍と硝化量の4.6倍とし, さらにDO収支も加算した. KLaは, ろ材層内でDOの経時変化がないものとみなして[5]式から算出した. 表5からKLaは, 27 1/h, η は18%となり, 送気量が少なくてよいことが理解できる.

$$KLa = r_r / (DO_s - DO_L) \dots\dots\dots [5]$$

ここで, r_r : 酸素利用速度 [mg/(ℓ ・h)]

DO_s : 飽和酸素濃度 [mg/ ℓ]

DO_L : ろ材層の酸素濃度 [mg/ ℓ]

4. ま と め

生物膜ろ過法によって下水高度処理実験を行い, 以下の知見を得ることができた.

(1) 砂ろ過とほぼ同等なろ過速度120m/dにおいて, SS・BODが適切に除去できる.

(2) ろ過速度を下げると, NH₄-Nの硝化が効率的に生じる. BOD除去とNH₄-Nの硝化の競合関係について検討したところ, はじめにBODが1次式にしたがって除去され, その後でNH₄-Nが0次式にしたがって硝化される. それぞれの反応速度定数は0.22 1/min, 0.92mg/(ℓ ・min)である.

表4 水質分析結果

項 目	原 水	ろ材層	処理水
水 温 [°C]	14.9	14.1	12.9
D O [mg/ℓ]	2.6	5.48	8.8
BOD [mg/ℓ]	29.1		1.4
NH ₄ -N [mg/ℓ]	23.1		0.74

表5 総括容量係数と酸素利用効率

項 目	値
処理水量	[ℓ /h] 189.0
送 気 量	[N ℓ /h] 479.2
BOD除去量	[g/h] 5.2
硝 化 量	[g/h] 4.2
酸素供給量	[g/h] 143.1
酸素消費量	[g/h] 25.8
酸素利用速度	[mg/(ℓ /h)] 121.0
総括容量係数, KLa	[1/h] 27.1
酸素利用効率, η	[%] 18.1

(3) 総括容量係数を求めたところ27 1/hであり, 送気量の少なくてよいことが裏づけられた.

参 考 文 献

- 1) Leglise, J. P., Gills, P., and Moreaud, H., : A New Development in the Biological Aerated Filter Bed Technology, Paper Presented at 53rd WPCF Annual Conference, Las Vegas, Nevada, U. S. A., Oct., 1980
- 2) 府中裕一: 生物膜ろ過装置による有機性廃水の処理, 用水と排水, Vol. 25, No. 5, p. 477, 1983
- 3) Stensel, H. D., Lee, K. M., Melcer, H., and Rankness, K., : Biological Aerated Filter Evaluation, ASCE Jour. Environmental Engineering, Vol. 114, p. 655, 1988
- 4) 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. 56, No. 8, p. 2, 1987