

(41) 二重管型反応器による下水からの窒素除去に及ぼす 有効水深の影響に関する研究

Effect of effective depth of the reactor on nitrogen removal from domestic sewage
by a draft tube type reactor

藤原 拓*, 宗宮 功*, 津野 洋**, 奥野芳男***

Taku FUJIWARA*, Isao SOMIYA*, Hiroshi TSUNO**, Yoshio OKUNO***

Abstract,

Effect of effective depth of the reactor on nitrogen removal from domestic sewage by a draft tube type reactor is discussed with the data from continuous-treatment experiments. More than 2 minutes of the circulating time in the annulus part is required to obtain more than 70% of TN removal efficiency. As effective depth affects on circulating time, the range of D_i/D_o (the ratio of draft tube diameter to diameter of the reactor), in which high TN removal efficiency can be obtained, increases as effective depth increases. More than 70% of TN removal efficiency can be obtained in the reactor with depth of 6m under D_i/D_o conditions of both 0.19 and 0.26, while it can be obtained only when D_i/D_o is 0.19 in the reactor with depth of 4m.

KEYWORDS; Draft-tube type reactor, Effective depth, Nitrogen removal, Sewage

1. はじめに

筆者らは、単一槽エアリフト循環型反応器である二重管型反応器を用いた下水からの効率的窒素除去法の開発研究を行っている。本反応器では内管部において曝気を行うことにより、内管部を上昇し外管部を下降する循環流が生じる。本反応器の内管部では曝気に伴う溶存酸素濃度 (DO) の増加が、外管部では微生物による酸素消費活性に伴う DO の減少が生じるため、反応器内で好気・無酸素の両ゾーンの作成が可能となり、その結果単一反応器内での硝化・脱窒処理が可能となる。

本反応器の装置因子としてのドラフトチューブ径と反応器径の比 (D_i/D_o) は、好気・無酸素両ゾーンを反応器内で同時に作成するために重要な外管部下降時間に影響を及ぼし、その結果 TN 除去率に大きな影響を及ぼすことが明らかになっている¹⁾。

また、筆者らは二重管型反応器の液循環流速予測式を構築しており²⁾、それによると D_i/D_o のみならずドラフトチューブ高さも外管部下降時間に影響することが明らかになっている。二重管型反応器においては、ドラフトチューブ上端から水面、あるいは下端から反応器底までの距離を一定としているため、このことはすなわち反応器有効水深が外管部下降時間に影響し、その結果 TN 除去率にも影響を及ぼす可能性があることを示唆している。

そこで、本研究では有効水深の異なる 2 系列の二重管型反応器を使用し、各々をほぼ同一の操作条件下で運転した場合の処理結果を比較・検討することにより、二重管型反応器の有効水深が窒素除去に及ぼす影響に関して考察を行う。さらに、有効水深が外管部下降時間に及ぼす影響に関して検討するとともに、本反応器で高い TN 除去率を得るために必要な外管部下降時間に関する考察を加える。

* 京都大学工学研究科環境工学専攻 (Department of Environmental Engineering, Kyoto University)

** 京都大学工学研究科附属環境質制御研究センター (Research Center For Environmental Quality Control, Kyoto University)

*** アタカ工業株式会社技術研究所 (Ataka Construction & Engineering Co., LTD)

2. 実験方法

実験は、H市内の団地污水处理場内に設置したパイロットプラントを用いて、1996年10月から1997年1月にかけて、及び1997年12月から1998年4月にかけて行った。

2.1 実験装置

Table 1 に実験装置の諸元を示すとともにFig.1 に実験装置を示す。実験装置は主として生物反応器と最終沈殿池から構成され、最初沈殿池は設けていない。本研究で生物反応器として用いる二重管型反応器は、縦型の反応器に同心円状にドラフトチューブを挿入した構造であり、その内管部において曝気を行うことにより、内管部を上昇し外管部を下降する循環流が生じる。本反応器の内管部では曝気に伴う溶存酸素濃度 (DO) の増加が、外管部では微生物による酸素消費活性に伴う DO の減少が生じるため、適切な操作・設計条件下で運転することにより、反応器内で好気・無酸素の両ゾーンの作成が可能となり、その結果単一反応器内での硝化・脱窒処理が可能となる。本実験は2系列 (Apparatus 1 および 2) で行い、系列1 (Apparatus 1) は生物反応器有効水深を4m、系列2は6mとした。ドラフトチューブ高さは系列1では3.5m、系列2 (Apparatus 2) では5.5mとし、その他の装置条件は系列1と2で等しくしている。また、両系列ともに内径が5.6cmおよび7.7cmの2種類のドラフトチューブを反応器内に挿入して実験を行い、窒素除去に適した D_i/D_o 条件が反応器水深により変化するかどうかを検討した。最終沈殿池に関しては、系列2のみライジングスラッジ流出防止設備を設け、最終沈殿池における脱窒に起因するライジングスラッジが直接放流されないようにしたため、系列1ではライジングスラッジが直接流出し、SSの処理成績が悪化する可能性がある。なお、水深が0.2mの地点におけるDO値をDOコントローラーを用いて空気量の増減により一定値に制御することにより、反応器内に好気ゾーンと無酸素ゾーンの双方を作成できるようにした。

2.2 実験条件

Table 2 に実験条件を示す。BOD-SS 負荷は $0.08 \sim 0.12 \text{ kgBOD}/(\text{kgMLSS} \cdot \text{day})$ 、BOD 容積負荷は $0.30 \sim 0.41 \text{ kgBOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{day})$ 、TKN (全ケルダール性窒素)・SS 負荷は $0.020 \sim 0.028 \text{ kgN}/(\text{kgMLSS} \cdot \text{day})$ とした。また、HRT は 10 h $\sim$ 12 h とし、従来の窒素除去法である循環式嫌気好気活性汚泥法などと比較して短く設定している。また、MLSS 濃度を $3,000 \text{ mg/L}$ 程度とすることにより、10 日以上の上留率 (SRT) を確保した。なお、本研究では流入水の C/N 比を高く維持し、脱窒のための有機物を確保する目的で、パイロットプラントの流入下水として高濃度で固形性有機物を含有する生下水を直接使用することとし、団地下水処理場沈砂池流出水を使用した。ところで、二重管型反応器において 80% 以上の硝化率および脱窒率を同時に得るために必要な条件として、Fujiwara らは好気ゾーン比 (DO が 0.5 mg/L 以上の部分の容積が全容積中に占める割合) を 0.2 以上、かつ無酸素ゾーン比 (DO が 0.1 mg/L 以下の部分の容積が全容積中に占める割合) を 0.3 以上に維持する必要があることを明らかにしている⁹⁾。そこで、本研究における DO の制御値に関しては、硝化を優先させるために 0.9 mg/L 以上とし、その上で上記の条件を満たすために各 Run で調整した。なお、系列1のRun1と系列2のRun1、また系列1のRun2と系列2のRun2はほぼ同一の実験条件とし、これらの処理結果を比較すること

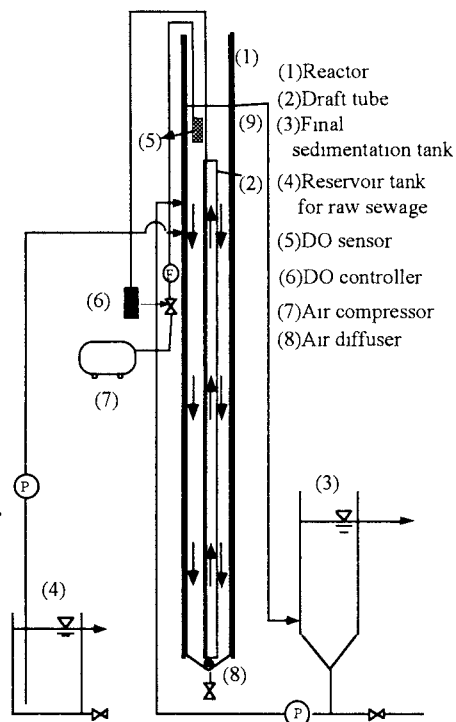


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Dimensions of experimental apparatus

Apparatus		1		2	
Run		1	2	1	2
Reactor	Draft Tube Diameter (cm)	5.6	7.7	5.6	7.7
	D_i/D_o (-)	0.19	0.26	0.19	0.26
	Effective Volume (L)	273	269	412	405
	Effective Depth (m)	4.0		6.0	
	Inner Diameter of the reactor (cm)	29.8			
	Height of the draft tube (cm)	3.50		5.50	
	Distance from upper end of the draft tube to water level (cm)	4.0			
	Distance from bottom of the reactor to lower end of the draft tube (cm)	1.0			
	Depth of inlet (inflow) (cm)	9.0			
	Depth of inlet (return sludge) (cm)	7.0			
Final Sedimentation Tank	Effective Volume (L)	69.4		12.4	

Table 2 Experimental conditions (average)

Apparatus	1		2	
Run	1	2	1	2
Date	'96Oct 4- '96Dec 22	'96 Dec 23- '97 Jan 14	'97 Dec 12- '98 Feb 6	'98 Feb. 24- '98 Apr 10
Time elapsed (d)	1-85	86-102	1-57	75-120
HRT (h)	11.3	10.3	11.9	11.9
Flow in influent (m^3/day)	0.580	0.625	0.829	0.817
Return sludge ratio (%)	59.9	57.9	58.7	59.2
Water temperature ($^{\circ}C$)	19.1	19.0	18.3	19.1
MLSS concentration (mg/L)	3730	3480	3200	2890
Regulated value of DO (mg/L)	1.3	0.9	1.7	0.9
Air flow (L/min) (DO < Regulated value)	9.7	9.4	11.3	11.8
Air flow (L/min) (DO > Regulated value)	3.6	3.3	4.9	4.5
Aerated depth (m)	3.5	4.0	5.5	6.0
BOD-MLSS loading rate ($kgBOD/(kgMLSS \cdot day)$)	0.079	0.118	0.103	0.124
BOD volumetric loading rate ($kgBOD/(m^3 \cdot day)$)	0.298	0.409	0.330	0.358
TKN-MLSS loading rate ($kgN/(kgMLSS \cdot day)$)	0.020	0.028	0.024	0.027
TKN volumetric loading rate ($kgN/(m^3 \cdot day)$)	0.075	0.098	0.078	0.078
SRT (day)	43	12	13	11
HRT in final sedimentation tank (h)	2.87	2.66	3.59	3.65
Actual retention time in final sedimentation tank (h)	3.21	3.02	2.26	2.29
Surface loading rate in final sedimentation tank ($m^3/(m^2 \cdot day)$)	7.38	7.86	6.70	6.62

Table 3 Items of water quality

Items	Unit	Methods for the Examination
Water Temp	$^{\circ}C$	TOKO DO METER TOX-901
pH	-	Electrometric Method (CENTRAL KAGAKU CO., LTD UC-23 DIGITAL pH/ORP METER)
Alkalinity	$mgCaCO_3/L$	Titration Method (Total Alkalinity)
DO	mg/L	Membrane Electrode Method (TOKO DO METER TOX-901)
SS	mg/L	Total Suspended Solids Dried at $103-105^{\circ}C$ (Glass-fiber filter disk GF/B)
T,D-BOD	mg/L	5-Day BOD Test (With addition of ATU to make a final concentration of $2mg/L$)
TOC,DOC	mgC/L	Combustion-Infrared Method (Shimazu, TOC5000)
$NH_4^{+}-N$	mgN/L	Phenate Methods
$NO_2^{-}-N$	mgN/L	Colorimetric Method (TECHNICON, Auto Analyzer II)
$NO_3^{-}-N$	mgN/L	Automated Cadmium Reduction Method (TECHNICON, Auto Analyzer II)
T,DN	mgN/L	Alkaline persulfate method, Automated Cadmium Reduction Method (TECHNICON, Auto Analyzer II)

により反応器有効水深が窒素除去に及ぼす影響に関して考察することとした。なお実験操作期間中、週に1日あるいは2日の頻度で生物反応器流入水、返送汚泥、生物反応器流出水、最終沈殿池流出水のサンプリングを行い、Table 3³⁾⁴⁾に示す各種水質について分析した。なお、サンプリングは流入水および最終沈殿池流出水に関しては2時間間隔の24時間コンポジット採水を行い、生物反応器流出水および返送汚泥に関しては午後2時のスポット試料として行った。なお、生物反応器内管部および外管部において、1m毎にDO濃度の測定を行い、好気ゾーン比および無酸素ゾーン比の計算に利用した。

3. 実験結果および考察

3.1 実験結果

Fig.2に好気ゾーン比および無酸素ゾーン比の経日変化を示す。Fig.2より、系列1のRun1および系列2においてはほぼ好気ゾーン比が0.2以上、無酸素ゾーン比が0.3以上という条件を満たしていることが示されている。これに対して、系列1のRun2では、無酸素ゾーン比が0.3以下となっており、系列2のRun2とDO制御値が0.9mg/Lと等しいにもかかわらず、無酸素ゾーンの作成が不十分であったことが示されている。すなわち、有効水深4mの反応器では D_t/D_o が0.19の条件下のみ高い脱窒率を得るために必要な0.3以上の無酸素ゾーン比を確保できたのに対して、有効水深を6mとすることにより D_t/D_o が0.19および0.26の双方の条件下で上記の無酸素ゾーン比を確保できた。以上より、反応器有効水深の増加により、高い脱窒率を得るために必要な0.3以上の無酸素ゾーン比を確保することの可能な D_t/D_o の範囲が増加することが明らかになった。

Fig.3にSSの経日変化を示す。SSの平均除去率は系列1のRun1および2で各々81%および6%、系列2のRun1および2で各々89%、93%であった。系列1ではライジングスラッジ流出防止設備を最終沈殿池に設けていなかったため、ライジングスラッジが発生したRun2でのSS除去率が極端に悪化した。しかしながら、その他のRunでは81~93%と高い除去率を得ている。

Fig.4に全有機炭素(TOC)濃度の経日変化を示す。TOCの平均除去率は系列1のRun1および2で各々83%および37%、系列2のRun1および2で各々87%、91%であった。SS除去率が悪化した系列1のRun2を除き、高い除去率を得ている。Fig.5に系列2におけるBOD濃度(ATU添加)の経日変化を示すが、流出水の溶解性BOD

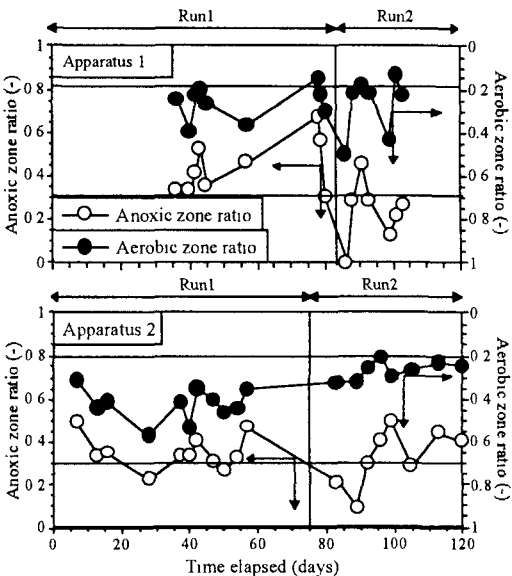


Fig.2 Time course of aerobic zone ratio and anoxic zone ratio

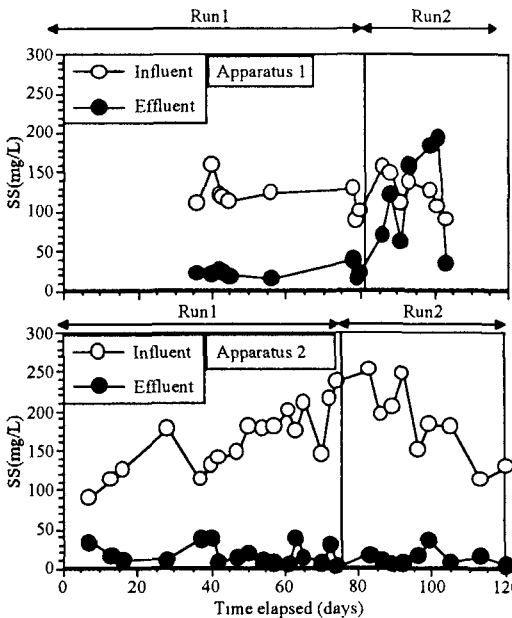


Fig.3 Time course of SS

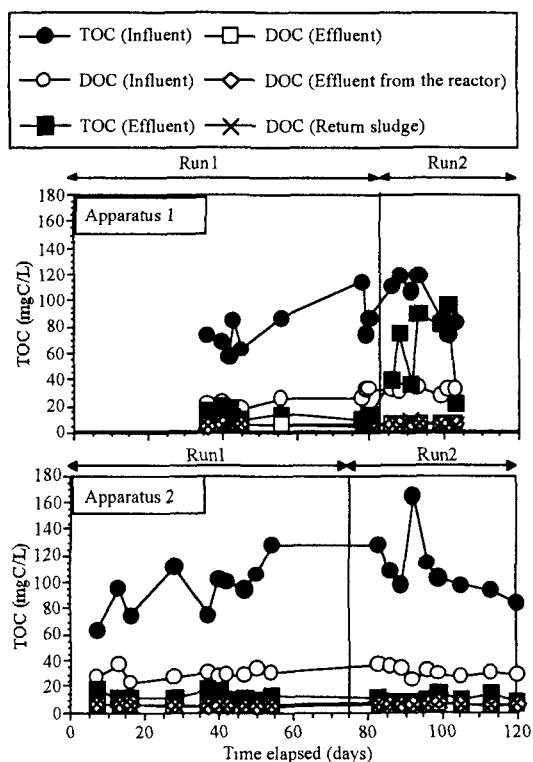


Fig. 4 Time course of TOC

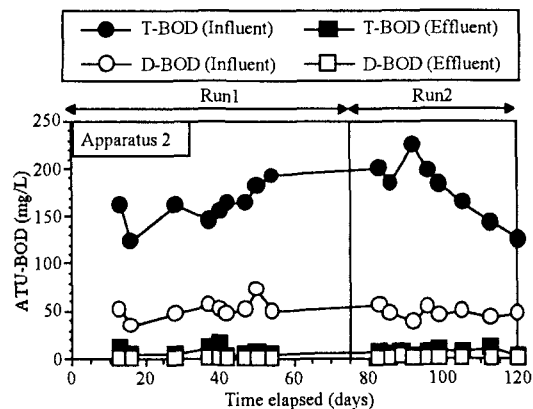


Fig. 5 Time course of ATU-BOD

濃度は常に 3mg/L 以下であり、溶解性易分解性有機物はほとんど残存していない。また、T-BOD 除去率は系列 2 の Run1 および Run2 で各々平均 95% および 96% であった。流出水の TOC および DOC 濃度は SS 除去率が悪かった系列 1 の Run2 を除けば系列にかかわらず TOC が 10 ~

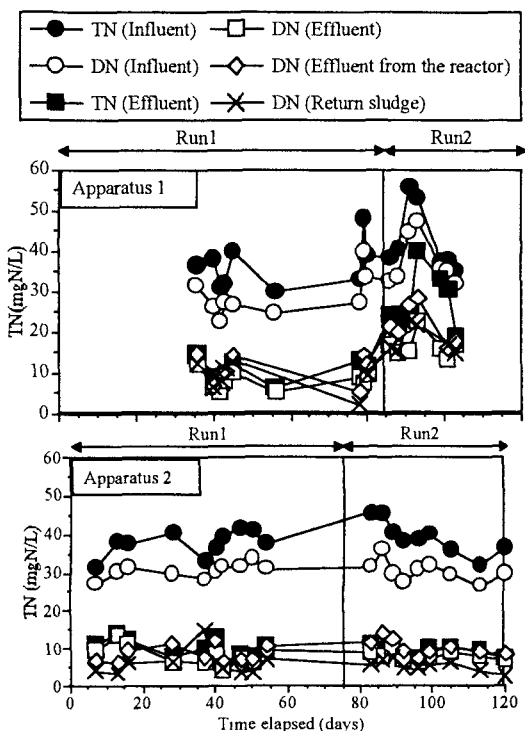


Fig. 6 Time course of TN

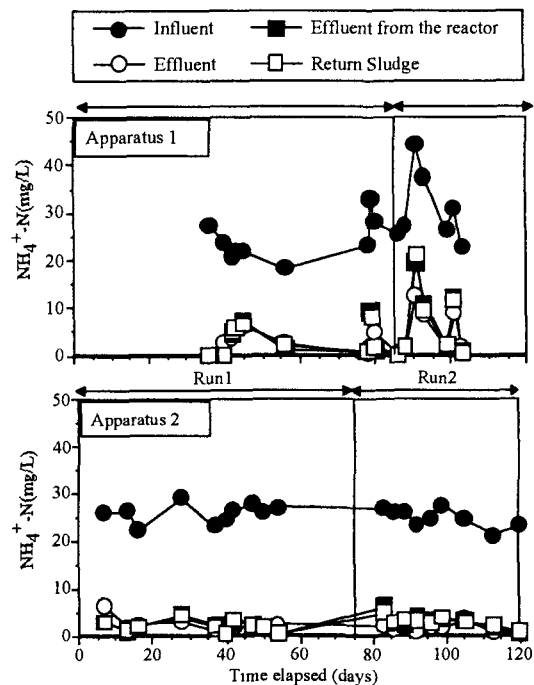


Fig. 7 Time course of NH_4^+-N

13mgC/L、DOC が5~6mgC/L とほぼ一定している。残存するDOC 成分は系列2のBODの結果より難分解性有機物と考えられることから、系列2の方が系列1よりもTOC 除去率が高かった理由は単に流入水濃度が高かったためと考えられる。すなわち、生物易分解性有機物に関しては二重管型反応器の有効水深にかかわらず良好に除去されることが明らかになった。

Fig.6 に全窒素 (TN) 濃度の経日変化を示す。TN の平均除去率は系列1のRun1 および2で各々72%および36%、系列2のRun1 および2で各々74%および76%であった。SS 除去率が悪かった Run2 の除去率は低い。ただ、系列1のRun2はDN 除去率も56%と低く、このRun は溶解性窒素の除去も不十分であったことが明らかである。

Fig.7 にアンモニア性窒素濃度の経日変化を示す。アンモニア性窒素の平均除去率は系列1のRun1 およびRun2で各々88%および84%、系列2のRun1 およびRun2で各々92%および94%と高い値を得た。本研究では硝化を優先させた DO の制御を行っているためいずれの条件下でも硝化は良好に進行したといえる。

流出水濃度平均値は系列2のRun1 およびRun2で各々2.1mgN/L および1.6mgN/L であった。系列1のRun2でやや平均流出水濃度が高いが、これは通算91日目(1月2日)および93日目(1月4日)の正月期に極めて高濃度のアンモニア性窒素が流入し、処理が対応できなかったことが影響している。これらを除いた平均値は2.8mgN/L であり、他の条件とほとんど差はない。以上より、硝化優先の運転を行うことにより、硝化反応は反応器水深にかかわらず良好に進行することが明らかになった。

Fig.8 に酸化態窒素濃度の経日変化を示す。流出水酸化態窒素濃度の平均値は系列1のRun1 およびRun2で各々4.6mgN/L および10.7mgN/L であり、系列2のRun1 およびRun2で各々

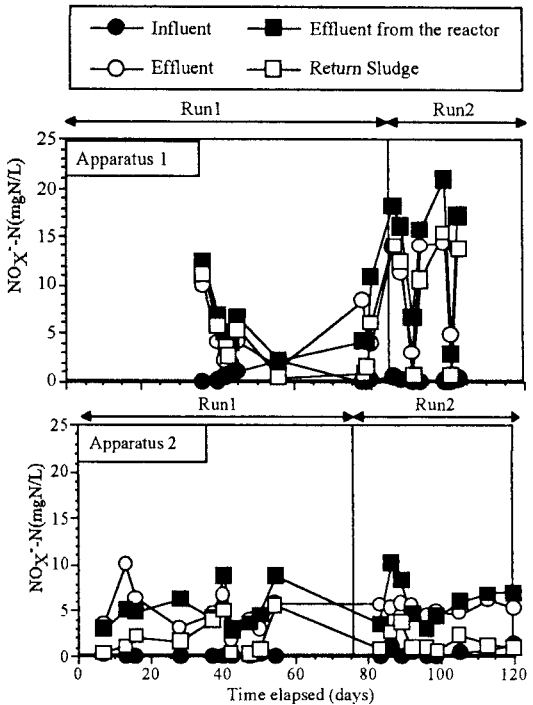


Fig. 8 Time course of NO_x-N

Table 4 Water Quality (average)

Apparatus	1						2					
	1			2			1			2		
Run	Inf	Eff	Removal Efficiency (%)	Inf	Eff	Removal Efficiency (%)	Inf	Eff	Removal Efficiency (%)	Inf	Eff	Removal Efficiency (%)
Alkalinity (mgCaCO ₃ /L)	157	62.2	60.4	174	39.1	77.5	145	51.8	64.2	147	46.1	68.6
pH (-)	7.18	6.81	-	7.21	6.70	-	7.62	7.00	-	7.52	6.95	-
SS (mg/L)	118	22.8	80.7	125	117	5.89	148	17.0	88.5	184	12.9	93.0
TOC (mgC/L)	78.6	13.2	83.2	99.2	62.6	37.0	96.7	12.6	87.0	110	10.4	90.5
DOC (mgC/L)	23.8	5.4	77.2	32.1	6.03	81.2	30.0	5.47	81.8	31.3	6.03	80.7
TN (mgN/L)	36.5	10.2	72.1	42.7	27.4	35.7	38.0	9.80	74.2	39.3	9.33	76.3
DN (mgN/L)	28.8	8.19	71.6	37.4	16.5	55.8	30.7	8.16	73.4	30.3	7.99	73.6
NH ₄ ⁺ -N (mgN/L)	24.3	2.97	87.8	30.7	4.92	84.0	26.0	2.11	91.9	24.7	1.56	93.7
NO _x -N (mgN/L)	0.72	4.59	-	0.23	10.7	-	0.11	4.78	-	0.46	5.32	-

4.8mgN/Lおよび5.3mgN/Lであった。 $D_i/D_o=0.19$ の条件で実験を行ったRun1においては、系列1及び系列2の双方で良好に脱窒が生じている。これに対して $D_i/D_o=0.26$ としたRun2では、水深を4mとした系列1では脱窒が不十分であったのに対して、水深を6mとした系列2では脱窒が良好に進行している。これは上述したように水深を4mから6mに増加させることにより、 $D_i/D_o=0.26$ の条件下でも無酸素ゾーンの確保が可能になったためと考えられる。

以上より、二重管型反応器を用いて硝化優先の条件で運転を行っている場合、反応器水深の増加は易分解性有機物除去、あるいは硝化には影響を及ぼさないが、脱窒が良好に進行する D_i/D_o の範囲が広がることが明らかになった。なお、処理結果についてTable 4にまとめて示す。

3.2 外管部下降時間と窒素除去の関係

処理結果より、反応器有効水深を4mから6mと増加させることにより、脱窒が良好に進行する D_i/D_o の範囲が広がることが明らかになった。ここで、有効水深の増加は上述した外管部下降時間に影響すると考えられる。そこで、外管部下降時間と窒素除去の関係についてここでは考察を加える。

本反応器では、DO測定値が設定値以上になった場合には曝気量を少なく、設定値以下となった場合には曝気量を多くすることにより、水深0.2mの地点におけるDOを一定に制御している。本研究では、各々の場合の曝気量および曝気量が多くなった時間を記録することにより、一日の平均曝気量の算出を試みた。結果をTable 5に示す。

一方、筆者らは二重管型反応器の液循環流速に関する経験式を構築している²⁾。この経験式では内管部液循環流速が、内管部における液に関するフルード数、内管部径深、流速係数、反応器全断面における空気に関するフルード数、 D_i/D_o 、内管部と外管部の断面積比、ドラフトチューブ高さ、ならびに気体および液体の流量、密度、粘度の関数として表現されている。したがって、この式は種々の操作・設計条件下の二重管型反応器に適用が可能であり、実験結果を用いた検証もなされている²⁾。

Table 5に示す平均曝気量から計算される反応器断面積あたりの空気流量 $U_g(\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$ 、およびその他の装置因子、液物性などをこの経験式に代入し試行錯誤計算により内管部平均液循環流速 $U_L(\text{m/s})$ を算出した。計算に際しては混合液の物性は同じ水温の清水と等しいとして計算している。

また、次式により外管部下降時間 $t_B(\text{s})$ を計算した。

$$t_B = \frac{H_d}{U_L \times (A_i / A_a)} \quad (1)$$

ここで、 H_d はドラフトチューブ高さ(m)、 A_i は内管部断面積(m^2)、 A_a は外管部断面積(m^2)である。Fig.9に外管部下降時間とTN除去率の関係を示す。なお、系列1のRun2に関しては、SS除去率が低くTN除去率が硝化・脱窒性能を直接表さないため、100%のSS除去が行われたと仮定した場合のTN除去率計算値(すなわち流出水TN濃度=流出水DN濃度として除去率を計算)も参考のために併せてプロットしている。Fig.9より、70%以上のTN除去率を得るには120秒程度の外管部下降時間が必要であることが示されている。ここで、外管部下降時間の平均値は系列1のRun1およびRun2で各々188秒および93秒

Table 5 Average air flow (L/min)

Apparatus	1		2	
Run	1	2	1	2
Data	7	5	5	6
Average	7.2	6.5	9.8	6.3
Maximum	8.7	7.4	10.4	7.1
Minimum	6.1	5.6	9.0	5.3
Standard deviation	0.9	0.7	0.5	0.7

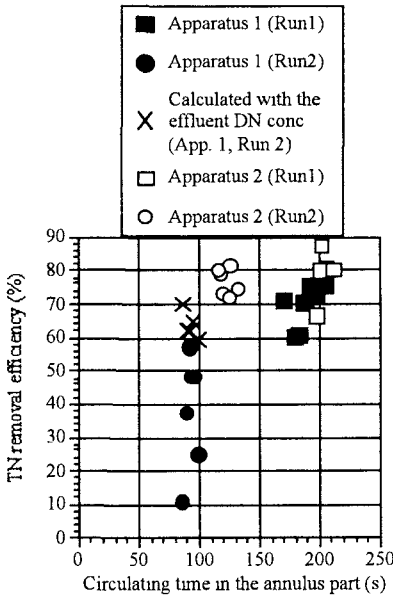


Fig. 9 Circulating time in the annulus part and TN removal efficiency

であり、系列 2 の Run1 および Run2 では各々 204 秒および 124 秒であった。すなわち、反応器有効水深を 4m から 6m へと 1.5 倍とすることにより、 $D_i/D_o=0.19$ の条件では t_B は 1.1 倍に、 $D_i/D_o=0.26$ の条件では t_B は 1.3 倍となった。この結果外管部に無酸素ゾーンを作成しやすくなり、TN 除去率が高くなったと考えられる。また、一方、反応器水深が一定の場合には D_i/D_o を 0.19 から 0.26 へと 1.4 倍に増加させることにより、水深 4m の反応器では t_B は 0.5 倍に、水深 6m の反応器では t_B は 0.6 倍となった。以上より、反応器水深の増加は外管部下降時間の増加に有効であるが、 D_i/D_o と比較すればその影響は小さいことが明らかになった。

4. まとめ

本研究では、BOD-SS 負荷が $0.08 \sim 0.12 \text{ kgBOD}/(\text{kgMLSS} \cdot \text{day})$ 、TKN-SS 負荷が $0.020 \sim 0.028 \text{ kgN}/(\text{kgMLSS} \cdot \text{day})$ 、MLSS 濃度が $2,900 \sim 3,700 (\text{mg/L})$ 、および HRT が $10 \text{ h} \sim 12 \text{ h}$ の条件下で、二重管型反応器による下水からの窒素除去に及ぼす有効水深の影響に関して実験的検討を加えるとともに、高い TN 除去率を得るために必要な外管部下降時間に関して考察を行った。得られた主要な成果を以下にまとめる。

(1) 二重管型反応器を用いて硝化優先の条件で運転を行っている場合、反応器水深の増加は無酸素ゾーンの作成に影響を与える。有効水深 4m の反応器では D_i/D_o が 0.19 の条件下のみ高い脱窒率を得るために必要な 0.3 以上の無酸素ゾーン比を確保できたのに対して、有効水深を 6m とすることにより D_i/D_o が 0.19 および 0.26 の双方の条件下で上記の無酸素ゾーン比を確保できた。すなわち、有効水深の増加により必要無酸素ゾーン比を確保することの可能な D_i/D_o の範囲が増加することが明らかになった。

(2) 反応器水深の増加は易分解性有機物除去、あるいは硝化には影響を及ぼさないが、必要無酸素ゾーン比を確保することの可能な D_i/D_o の範囲が増加するため、脱窒が良好に進行する D_i/D_o の範囲が広くなることを実証した。その結果、反応器水深が 6m の条件下では D_i/D_o が 0.19 および 0.26 のいずれの場合でも、TOC 除去率は 87% 以上、および TN 除去率は 74% 以上を得た。

(3) 二重管型反応器を用いて本研究と同様の操作条件下で下水からの窒素除去を行う場合、TN 除去率 70% 以上を得るには 2 分程度の外管部下降時間が必要であることが明らかになった。

(4) 反応器有効水深を 4m から 6m へと 1.5 倍とすることにより、外管部下降時間は $D_i/D_o=0.19$ の条件では 1.1 倍に、 $D_i/D_o=0.26$ の条件では 1.3 倍となった。したがって、反応器水深の増加は外管部下降時間の増加に有効であることが明らかになった。しかしながら、反応器水深の増加が外管部下降時間の増加に及ぼす影響は D_i/D_o の影響と比較すれば小さいことも明らかになった。

最後に本研究は文部省科学研究費(07455210)の補助、ならびに一部廃棄物研究財団からの研究費補助を受けて行ったものであることを付記する。

参考文献

- 1) Taku Fujiwara, Isao Somiya, Hiroshi Tsuno, Yoshio Okuno Effect of Draft Tube Diameter on Nitrogen Removal from Domestic Sewage in a Draft Tube Type Reactor, Water Quality International 1998 Conference Preprint Book 1, pp. 307-314
- 2) 藤原 拓、宗宮 功、津野 洋、奥野芳男：エアリフト二重管縦型下水処理反応器における液流動に関する研究、投稿中
- 3) 日本下水道協会；下水試験方法—1984 年版—
- 4) APHA: STANDARD METHODS, 18TH EDITION, 1992