

(24) 回分式活性汚泥法における窒素除去特性に関する研究

CHARACTERISTICS OF NITROGEN REMOVAL IN THE SEQUENCING BATCH ACTIVATED SLUDGE PROCESS

寺 島 泰*, 朴 東 根*

Yutaka TERASHIMA*, Dongkeun PARK*

ABSTRACT; In any sequencing batch activated sludge process, it has become one of the principal aims to remove nitrogen by utilizing effectively the organic substrate in raw-waste water. The influence of feeding and aerating conditions and also the behaviour of the related substrates during operation were studied by the laboratory experiments characterized by feeding pattern and the ratio of operating times without and with aerations [At/Ot] in one cycle. The main results are as follows:

1) Nitrogen removal efficiency was higher and more stable in the case of step-feeding than single-feeding methods.

2) It was effective for denitrification to supply raw wastewater under without aeration in all experimental conditions.

3) The optimum ratio of At/Ot was 0.6 in the anaerobic step-feeding methods.

4) Most of the soluble COD and soluble organic nitrogen which accumulated in the sludge during the feed were decomposed and oxidized during successive aeration. In the course of next feeding, the oxidized nitrogen was denitrified consuming the feeded soluble COD.

KEYWORDS; Batch activated sludge process, Denitrification, Operating condition, At/Ot ratio, Step-feeding,

1. はじめに

近年、水系の富栄養化の防止対策の一つとして、下・廃水中の窒素やリンの除去を目的としたプロセスと運転方式とが多様に検討かつ提案されている^{1)~7)}。このようなプロセスと運転方式の検討、開発においては、除去目的物質の高度処理ばかりでなく、建設及び運転管理の経済性や簡易性も考慮しなければならない。

中・小規模の下・廃水を効率的に処理する新しい方法の一つである回分式活性汚泥法は最近、非常に活発に研究されている。しかしながら炭素、窒素、リン化合物の分解、以後の硝化、脱窒、またリンの放出、そしてリンの過剰摂取などの各単位反応は相互に関連し、またそれぞれ異なった最適条件を持っていることに加え、非定常の系となるため、現象が非常に複雑となり、目指す運転方式と除去の内容についても多様な報告がなされる結果となっている。^{8)~12)}したがってまた回分式活性汚泥法による窒素除去についてみて⁹⁾、間欠曝気方式とか制限曝気方式の必要性は明らかにされているものの、現象の機構に基づく最適の嫌気・好気パターンや基質の供給方法、その他の最適運転条件など、なお解明すべき課題がおおく残されている。

このような観点から本研究では、まず回分式活性汚泥法における窒素の除去について、効率的な運転方式の確立を目指すとともに、各水質の挙動に基づいて現象の基礎を解明しようと試みた。すなわち、

1) 様々な可能な運転方式を基質の供給方式、曝気方式及びそれに関連する供給基質中の有機炭素性基質(COD_{Cr}, BOD₅等)当たりの窒素含有率((N/C)f)等について整理して検討を加え、最適運転方式を考究した。

2) 回分式活性汚泥法は非定常的流入であり、定常的流入と違った反応形態も生じている。とくに、基質が活性汚泥中に吸着・蓄積する現象に着目し脱窒現象との関連を考察した。

* 京都大学工学部衛生工学教室 (Dept. Environ. & Sanitary Eng., Kyoto University.)

2. 実験方法

2.1 馴致汚泥と基質の成分

実験に使用した汚泥は滋賀県O市下水処理場の返送汚泥を種汚泥としグルコース（あるいは可溶性デンプン）、ペプトン、牛肉エキスを主成分とした基質によって1984年11月から $20 \pm 1^\circ\text{C}$ の恒温室内で馴致したものである。

本実験に使用した基質は馴致時の基質と同様で、その組成はTable 1に示した。これは各RUNの1サイクルに供給した各成分の量を示したもので、RUN 1-1 から RUN 2-5 までは (N/C) f 比の調節用として不足する有機炭素源の供給をグルコースで補給したが、RUN 2-1 からはバルキングの問題が生じたため、RUN 3-1 からはグルコースのかわり可溶性デンプンを用いて不足する有機炭素を補給した。

2.2 実験方法

(A) 実験 I

実験は $20 \pm 1^\circ\text{C}$ の恒温室内で行ない、実験装置はFig. 1のように設置した。機械的な攪拌装置とpH、DOなどの自動測定記録装置とタイマーによる自動運転装置を備えた円筒状のアクリル製の反応槽（有効容量は15 L.）である。

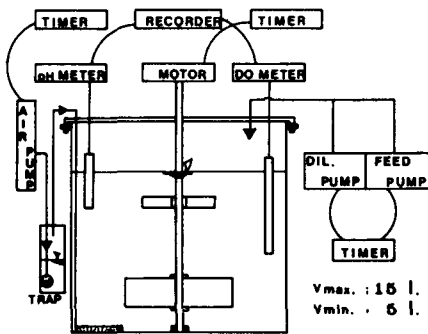


Fig. 1 Experimental apparatus.

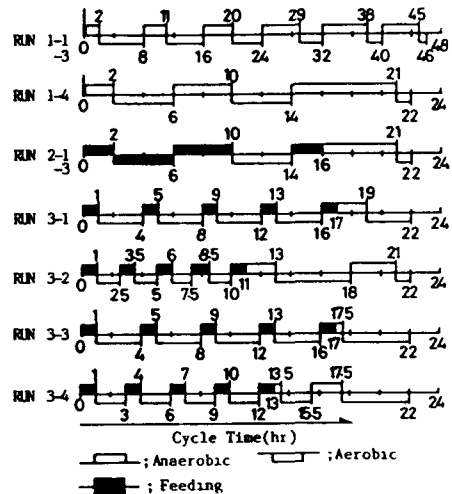


Fig. 2 Operating conditions.

Table 2 Operation conditions

RUN No.	I Single-Feeding (Spot)				II Step-Feeding (Twice)					III Step-Feeding (Five Times)			
	1-1	1-2	1-3	1-4	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	3-1	3-2	3-3	3-4
S-COD (g)	8.3	8.3	8.3	4.7	3.5	3.4	3.5	3.3	3.9	8.7	8.7	8.7	8.7
S-TN (g)	2.2	1.8	1.7	0.77	0.27	0.34	0.43	0.51	0.80	0.97	0.97	0.97	0.97
PO ₄ ³⁻ -P (mg)	380	370	430	120	90	94	83	88	110	250	250	250	250
Alkalinity (g)	3.5	3.6	5.1	3.9	1.8	1.8	3.1	3.1	3.0	3.8	3.8	3.3	3.3
MLSS (g)	15.7	30.5	49.4	40.1	38.3	36.6	31.3	33.9	41.2	42.6	42.7	37.7	39.5
SRT (days)	4	8	29	13	38	36	20	24	29	11	11	10	9

各 RUN の運転条件は Fig. 2 と Table 2 に示した。RUN 1-1 から RUN 1-4 までは基質を 1 回供給（瞬間的に）し、間欠曝気したもので、RUN 1-1 から RUN 1-3 までは 1 サイクルが 48 時間であり、RUN 1-4 は 24 時間である。RUN 2-1 から RUN 2-5 までは (N/C)f 比と窒素除去率を調べるために設定した条件である。基質の供給方式（2 回分注供給）、間欠曝気のパターン、基質の供給負荷、1 サイクル時間などの運転条件はほぼ一定にした。RUN 3-1 から RUN 3-4 までは 1 サイクルの中で基質を 5 回にわけて等量分注し、間欠曝気によって運転したものである。かつ、Table 2 には各 RUN の 1 サイクルあたりに供給した基質の量、汚泥滞留時間（SRT）などの運転条件を示した。

(B) 実験Ⅱ

各実験サイクル中の窒素化合物の経時変化を調べた。また、活性汚泥中に吸着・蓄積された基質の再溶出、再溶解を調べるために、SV₃₀測定用サンプルを用いて、SV₃₀の測定初期から SV₃₀の測定が終了するまで反応液を静置させ、SV₃₀の測定が終わると上澄液の半分を捨てた後、嫌気攪拌及び好気攪拌を行ない、余剰汚泥の嫌気・好気的な経時変化を観察した。

2.3 分析方法

分析項目は MLSS, SV₃₀, SVI, そして液相の COD, Kj-N, NH₄⁺-N, NO₂⁻-N, NO₃⁻-N, PO₄³⁻-P, 総アルカリ度, pH, DO である。MLSS の測定は RUN 1-1 から RUN 2-5 までは下水試験方法¹³⁾で、RUN 3-1 からは S 社製の電子式水分測定計 (EB-280 MOC) によって行なった。SV₃₀ と総アルカリ度、有機態窒素の分解・蒸留は下水試験方法¹³⁾により、NO₂⁻-N, NO₃⁻-N, PO₄³⁻-P は D 社製の Ionchromato 2000i より、COD_{Cr} と NH₄⁺-N, そして Kj-N の分解蒸留物質は T 社製の Auto Analyzer II によって行なった。pH と DO は自動モニターによって記録した。

3. 実験結果及び考察

3.1 回分式活性汚泥法に

よる窒素除去能の評価

多様な運転方式となつて

いる回分式活性汚泥法にお

ける窒素除去を評価するた

めに各種の運転因子を整理

して検討した。1 サイクル

時間 (Ct) 中の基質の実供

給時間 (It_n), 1Ct 中の基質

の実供給時間中の嫌気的な

実供給時間 (AIt_n), 1Ct

の中で基質の供給が終了す

るまでの時間 (供給終了時

間, It_t), 1Ct 中の嫌気的

な攪拌時間 (At) と好気的

な攪拌時間 (Ot), (N/C)f 比

等を検討項目とした。本研

究で行なった実験結果と文

献調査による結果^{9), 12), 14), 15)}

¹⁶⁾を並記して Table 3 に示

すように整理した。なお、

本実験では有機炭素性基質

Table 3 Operating results of each RUN and references

RUN No. Ref. No.	(N/C)f(%)*	It _n /It _t	AIt _n /It _n	At/Ot	Ct	S-TN Removal Eff. (%)
1-1	27 (46)	1.0	1.0	1.2	48	50(76)
1-2	22 (37)	1.0	1.0	1.2	48	61(78)
1-3	21 (36)	1.0	1.0	1.2	48	59(75)
1-4	16 (27)	1.0	1.0	1.4	24	65(73)
2-1	7.7(13)	0.75	0.67	1.4	24	96(87)
2-2	10 (17)	0.75	0.67	1.4	24	91(87)
2-3	12 (20)	0.75	0.67	1.4	24	88(89)
2-4	16 (27)	0.75	0.67	1.4	24	82(89)
2-5	21 (36)	0.75	0.67	1.4	24	66(85)
3-1	11 (19)	0.29	1.0	0.47	24	91(89)
3-2	11 (19)	0.45	1.0	0.83	24	92(90)
3-3	11 (19)	0.29	1.0	0.33	24	91(89)
3-4	11 (19)	0.38	1.0	0.52	24	94(92)
'4)	(23)	0.29	1.0	1.5	8	89(90)
'5)	(32)	1.0	1.0	0.27	6	60(76)
	(35)	1.0	0.5	0.27	6	63(81)
	(29)	1.0	0.5	0.27	6	51(62)
	(32)	1.0	1.0	0.43	8	65(79)
	(35)	1.0	1.0	0.50	8	78(96)
	(29)	1.0	1.0	1.3	12	67(78)
'12)	(18)	1.0	0	0	8	24(18)
'16)	(44)	1.0	1.0	0.5	12	61(90)
	(44)	1.0	1.0	0.38	8	51(80)
	(44)	1.0	1.0	0.5	6	54(83)
	(44)	0.18	1.0	0.6	12	82(100)
'9)	(15)	1.0	0	0	24	—
	(15)	1.0	0	0	24	—
	(15)	1.0	0.56	4.5	24	87(80)
	(15)	1.0	0.60	4.5	24	94(88)

Column * ; Figures in parentheses are based on BOD₅.

Column ** ; Figures in parentheses are based on 20%(N/C)f by BOD₅.

を COD_{α} として測定しており、これを BOD_5 として換算($COD_{\alpha}/BOD_5=1.7$)した数値をかつこ内に表わした。

(A) $(N/C)_f$ 比と窒素除去

Table 3 に基づいて、窒素除去と各種の因子の関係を検討する。 BOD_5 に基づいた $(N/C)_f$ 比と窒素除去率の関係を表わしたのが Fig. 3 である。これは基質の供給、曝気パターンを無視して供給基質との関係のみをみたものであるが、ある程度の相関関係が認められる。一方、基質の供給パターン、曝気パターンと窒素除去率との相関関係はほとんどみられなかった。これは窒素除去率に関与する多くの因子の中での $(N/C)_f$ 比の影響が最も大きいことを示している。これを確認するため窒素除去に関与する他の因子を一定とし、 $(N/C)_f$ 比のみを変化させて行なった実験の結果を Fig. 4 に示す。この結果は $(N/C)_f$ 比が高くなると脱窒に必要な有機炭素源が不足することを意味し、効率的な脱窒を行なうためには有機炭素源をうまく確保することが重要であることを示している。

一方、他の運転因子を比較するためには上述のように $(N/C)_f$ 比が大きく関与するため、 $(N/C)_f$ 比を一定にして考察する必要がある。しかし、一般下水を対象にした実験においても各研究者によって $(N/C)_f$ 比の巾が広い^{9), 12), 14), 15),}

¹⁶⁾ ため、Fig. 4 に基づいて $(N/C)_f$ 比を 20% となるように補正したのち、各運転因子の検討を行なった。

(B) 基質の供給方式、曝気方式と窒素除去率

回分式活性汚泥法の運転操作の特徴として、基質の供給や曝気がきわめて多様な方式で行なわれており、窒素除去に対する普遍的な運転操作は確立していないのが現状である。そのため、複雑な組み合わせを適切な操作因子で整理検討し、効率的な運転操作を探った。

(1) 基質の供給方式と窒素除去の関係

回分式活性汚泥法における基質の供給方式としては滞留時間分程の基質を 1 サイクル当たりに 1 回に全量を供給する方法 (1 回供給式と呼ぶ) と 2, 3...n 回に分けて供給する方法 (分注供給式と呼ぶ) とに大別される。この 1 回供給式と分注供給式を比較するために Fig. 5 で表わしてみた。 $I_{tn}/I_{tt}=1$ は 1 回供給式を意味し、 $I_{tn}/I_{tt}<1$ は分注供給式を意味している。Fig. 5 からみると分注供給式においては総じて高率な窒素除去率が得られる傾向にある。これは分注供給において分注回数を増やすか、分注供給の分注停止時間を長くすることによって高率な窒素除去が得られることを示唆している。一方、1 回供給式においては除去率の変動が大きく、他の操作因子が関与していると考えられる。以上から次の操作因子を検討する上で分注供給式と 1 回供給式に分けて考察した。

(2) 基質供給時における嫌気・好気の影響

基質供給時における槽内の嫌気・好気状態は脱窒反応を行なう上で重要となる。すなわち、脱窒反応時には嫌気的な状態と有機炭素源を必要とするため、有機炭素源が豊富となる基質供給時はできるだけ嫌気的な状態を保つことが望ましいものと考えられる。Fig. 6 は分注供給時における A_{Itn}/I_{tn} との関係を見たものである。こ

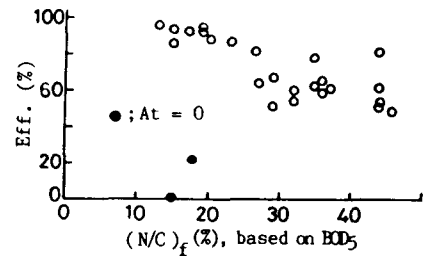


Fig. 3 Relationship between $(N/C)_f$ ratio and S-TN removal efficiency.

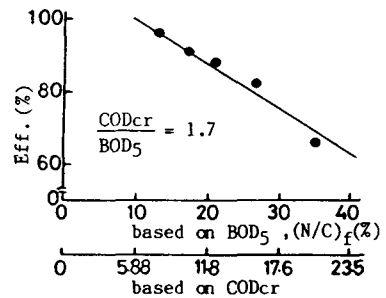


Fig. 4 Effects of $(N/C)_f$ ratio and S-TN removal efficiency.

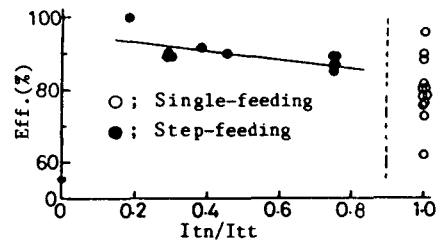


Fig. 5 Relationship between I_{tn}/I_{tt} ratio and S-TN removal efficiency.

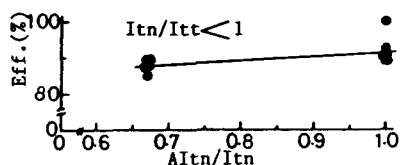


Fig. 6 Relationship between AItN/Itn ratio and S-TN removal efficiency.

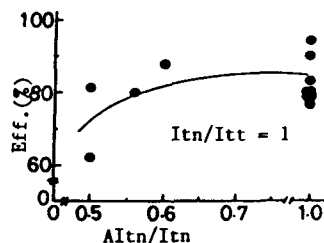


Fig. 7 Relationship between AItN/Itn ratio and S-TN removal efficiency.

の図にも示されるように、基質の供給時間中には全時間嫌氣的に保たれた方 ($AItN/Itn=1$) がより効果的であることがわかった。

すなわち、基質の供給時間中には曝気を停止する操作が望ましいことを示唆している。一回供給時においても Fig. 7 に示すように、分注供給時と同様の結果となった。

(3) 分注供給式における曝気方式

分注供給式においては全供給とも曝気停止時に供給する方が効率的であることがわかったが、供給基質を適切な硝化・脱窒プロセスにするには曝気時間 (O_t) と曝気停止時間 (A_t) の割合 (A_t/O_t) が重要となるため、Fig. 8 に示すように整理して検討した。これは分注供給式でかつ、曝気停止時に供給しているものについてプロットしたものである。

この図より $A_t/O_t=0.6$ 付近でピークとなっているが、これは $A_t/O_t=0.6$ までは嫌気時間が増す程脱窒作用が促進されることを示しており、 $A_t/O_t=0.6$ 以上となると嫌気時間がより増し、硝化反応を抑制するために不随的に窒素除去率も下がるものと考えられる。

(4) 1 回供給式における曝気方式

1 回供給式においても分注供給式と同様の検討を行なった。これは曝気停止時に 1 回供給した時の曝気方式について検討したもので Fig. 9 に示すような結果が得られた。 $A_t/O_t=0.5$ 付近において上に凸の急カーブを描いている。これは 1 回供給式が分注供給式と比べて曝気操作に大きく影響するためと考えられる。 $A_t/O_t=0.5$ までは急激に窒素除去率が高まるが、それ以上になると嫌気状態が増すため、硝化作用が抑制されて窒素除去率も低下するものと思われる。

(5) 回分式活性汚泥法における窒素除去に関する運転操作の総合評価

以上、回分式活性汚泥法における多くの運転操作因子を整理して検討した結果、その最適操作因子についてある程度定量的に把握することができた。Table 4 にその結果を示す。分注供給式あるいは 1 回供給式においても共通する操作項目は 1)、曝気方式において、硝化作用を抑制しない程度の曝気時間と曝気停止攪拌時間との割合が必要である。2)、基質供給時間の全時間は曝気を停止し、攪拌のみを行なう操作が効率

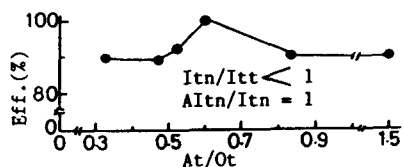


Fig. 8 Relationship between A_t/O_t ratio and S-TN removal efficiency.

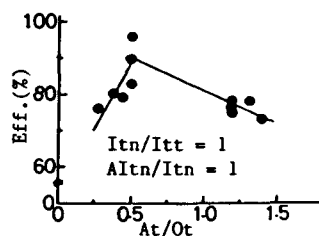


Fig. 9 Relationship between A_t/O_t ratio and S-TN removal efficiency.

Table 4 Relationship between operation condition and S-TN removal efficiency

Feeding Patterns	A_t/O_t	Average S-TN Removal Eff.(%)
Step-Feeding($Itn/Itt < 1$)	> 0	90
$AItN/Itn < 1$	> 0	87
$AItN/Itn = 1$	0.6	100
	< 0.6	90
	> 0.6	90
Single-Feeding($Itn/Itt = 1$)	> 0	80
$AItN/Itn < 1$	> 0	78
$AItN/Itn = 1$	0.5	90
	< 0.5	78
	> 0.5	76

のである。

一方、分注供給式か1回供給式のどちらが優位な操作となるかをみると、Fig. 8とFig. 9にも比較されるように1回供給式はA1/Ot比にも大きく影響されるように処理効率の変動巾が大きい。これは硝化・脱窒反応に必要な嫌気・好気状態を1回供給式においては曝気操作に委ねているのに対し、分注供給式においては供給方式と曝気操作の両操作から嫌気・好気状態を具現しているため、より安定した処理効率を得られることを示している。

3.2 窒素化合物の挙動

回分式活性汚泥法のような非定常状態での窒素化合物の挙動をみるため、1サイクル中の窒素化合物の経時変化をそれぞれFig. 10, 11, 12に示した。Fig. 13はRUN3-3とRUN3-4の余剰汚泥による嫌気的な経時

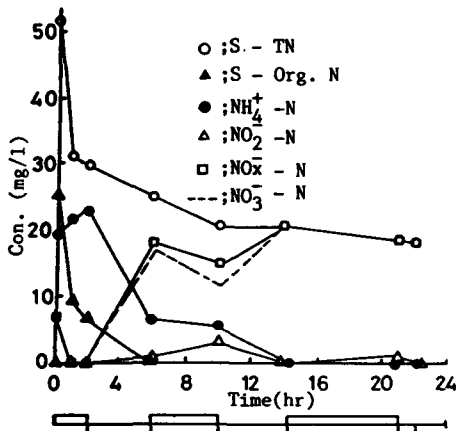


Fig. 10 Transition of nitrogen species during SBR operation of RUN 1-4.

変化を示し、Fig. 14はRUN3-3とRUN3-4の余剰汚泥による好気的な経時変化を示したものである。

(A) 窒素化合物の吸着・蓄積現象

Fig. 10から、基質の供給直後の1時間のあいだの嫌気攪拌時に、 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ の脱窒とともに液相の全窒素(S-TN)も減少している。この時、脱窒された $\text{NO}_x^- - \text{N}$ は7 mg/lであったが、S-TNの減少量は20 mg/lに達し、脱窒による $\text{NO}_x^- - \text{N}$ の減少量より13 mg/l (195 mg) 過剰に除去されている。このような現象はFig. 11, 12においても同様に認められる。すなわち、1回の嫌気的な基質供給1時間のあいだについて、S-TNの供給量と $\text{NO}_x^- - \text{N}$ の脱窒による窒素の減少量とに基づいて過剰に除去されたS-TNを計算すると、Fig. 11の最初の嫌気的な基質供給時では12 mg/l (84 mg)、4時間目からの供給時では7 mg/l (63 mg)となり、Fig. 12の最初の嫌気的な基質供給時では13 mg/l (91 mg)、5時間目からは8 mg/l (88 mg)となった。このように、基質の供給直後とか供給途中に液相の窒素の相当量が汚泥相に吸

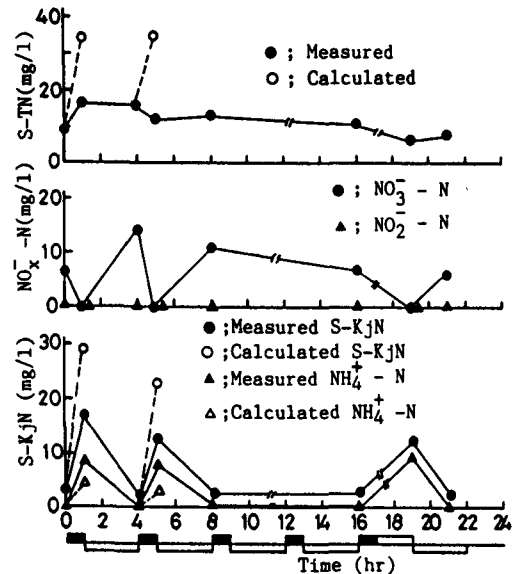


Fig. 11 Transition of nitrogen species during SBR operation of RUN 3-1.

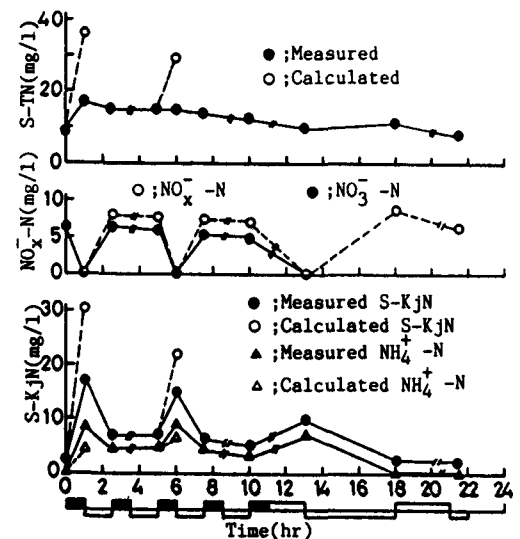


Fig. 12 Transition of nitrogen species during SBR operation of RUN 3-2.

Table 5 Excess removal rates by adsorption or accumulation of S-Org.N

RUN No.	Time(hr)	Excess Removal of S-Org.N (mg)	MLSS(g)	Rate (mgN/gMLSS.hr)	Load of S-Org.N (mgN/hr)
1-4	0-1	195	42.2	4.6	376
3-1	0-1	84	42.0	2.0	172
	4-5	63	42.4	1.5	170
3-2	0-1	91	43.5	2.1	187
	5-6	88	44.8	2.0	170

着・蓄積することが判明された。液相から過剰に除去された窒素はすべて液相の有機態窒素 (S-Org・N) であるが、その吸着・蓄積比速度の概略算定値は Table 5 に示した。S-Org・N の吸着・蓄積速度は S-Org・N の負荷に比例し、この現象は一般的な有機物の吸着反応と同様に基質の種、基質の供給方式、汚泥中の飽和吸着量などに関係するものと考えられる。

S-Org・N の過剰除去の現象からみても、一般的に細胞内部におけるグリコーゲンとか PHB の貯蔵現象¹⁷⁾ のみではなく、別の機構によっても溶解性の基質が除去されていることが推測される。これを基質の吸着・蓄積現象として、以下(C)の硝化・脱窒反応を解析した。

(B) 基質の溶出

RUN 3-3 と RUN 3-4 の 1 サイクルの反応終了液を用いて、汚泥からの基質の溶出現象を検討した。Fig. 13 は嫌気攪拌時の溶出現象を示したものであるが、液相に残留していた NO_x^- -N の脱窒が進行する一方で NH_4^+ -N と S-COD が溶出し、増加している。S-COD の溶出パターンは NO_x^- -N の存在時と NO_x^- -N が存在しない時において異なり、前者においては濃度増加が抑制されているが、後者においては再び濃度が増加している。これは NO_x^- -N の存在時には溶出した S-COD の一部が脱窒に利用されるためである。一方 NH_4^+ -N の溶出速度は一定であった。

Fig. 14 は好気攪拌時の溶出現象を示したものである。 NH_4^+ -N は濃度増加が小さく、増加後に減少しているが、汚泥からの溶出分は好氣的

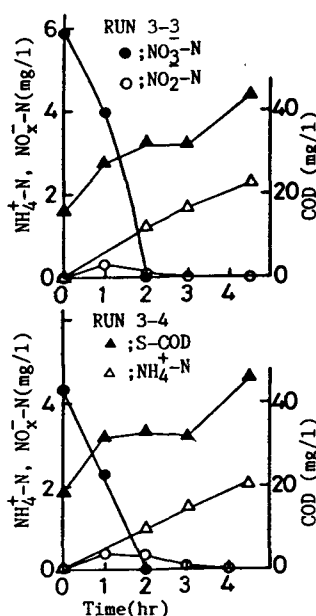


Fig. 13 Transition of each parameter during anaerobic mixing of wasted sludge.

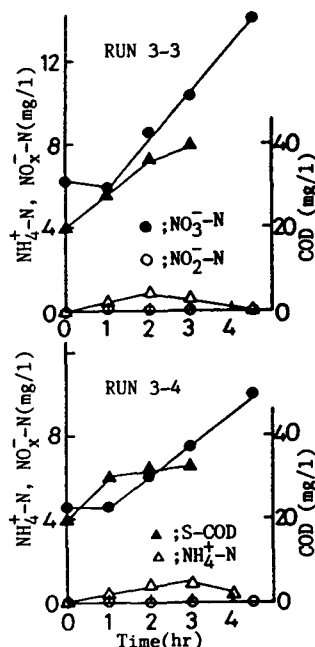


Fig. 14 Transition of each parameter during aerobic mixing of wasted sludge.

環境下で硝化されるために濃度増加として反映されない。S-COD も溶出分は酸化されるが、これを上まわる溶出が生じている結果として濃度が増加している。一方 NO_x^- -N については、初期の液相中ケルダル窒素 (S-KjN) は約 2 mg/l であったが、1 時間以後 (完全好氣的状態) においてこれを上まわる濃度として急速に直線的に増加している。溶出した NH_4^+ -N の硝化分も含まれるが、いずれにせよ窒素化合物の溶出が生じている。

嫌気、好気いずれの攪拌時においても生じるこのような基質の溶出現象は、(A) で示した吸着・蓄積基質の

加水分解に始まる代謝の過程で生じる溶出、微生物のライシスによる2次的基質の溶出などが主として関与していると考えられ、広義には汚泥の自己酸化（分解）に伴う現象とみなしうる。汚泥のライシス反応に関する研究結果（未発表）によれば、上に述べた窒素化合物の溶出のうちライシスによる溶出は約20～34%であり、吸着・蓄積窒素化合物の溶出は66～80%である。このような基質の溶出現象は、処理において効率を低下させる原因の一つであり、回分式活性汚泥法では、1サイクル中に処理対象となる基質を全て供給したのちの反応時間が長く、SRTが大きくなると、とくに窒素の、ついでCODの除去率が低下する。

(C) 硝化及び脱窒速度

Fig. 10～Fig. 14に対応する実験の条件と結果とに基づいて硝化速度、脱窒速度を近似的に算出した（Table 6、7）。硝化速度を見ると液相中のS-KjNが十分ある状態において硝化速度は0.59～1.6 mgN/gMLSS.hrとなっており、文献⁹⁾から比較しても同様な値を示している。しかし、液相中のS-KjNがほとんどなくなった後での硝化速度は0.27～0.47 mgN/gMLSS.hrである。後者は硝化速度が液相中のS-KjNに依存するという一般的な考え方から判断するよりも大きな値となっており、これは汚泥中のKjNが溶出し、液相中に出て硝化されたものと考えられる。

脱窒速度は、基質供給直後に NO_x^- -Nが消失するため正確な計算はできなかったが、いずれも1.0 mgN/gMLSS.hr以上であった。一方、基質供給後、時間が経過した時点での脱窒速度をみると、Fig. 15に示すように徐々に遅くなっている。しかし、この脱窒速度は単に液相中のCODに依存するという考え方では説明しにくい。すなわち、図に示されるように液相中のCODは時間経過後もあまりに変化は示していないが、脱窒速度は徐々に低下しており、脱窒速度の液相中のCOD依存性は認め難い。これは NO_x^- -Nの脱窒に必要な有機物を主として汚泥中に吸着・蓄積している有機物質の溶出に依存しているものと考えられ、経過時間が長くなると有機物の溶出量も減少するため脱窒速度が遅くなると考えられる。

と、Fig. 15に示すように徐々に遅くなっている。しかし、この脱窒速度は単に液相中のCODに依存するという考え方では説明しにくい。すなわち、図に示されるように液相中のCODは時間経過後もあまりに変化は示していないが、脱窒速度は徐々に低下しており、脱窒速度の液相中のCOD依存性は認め難い。これは NO_x^- -Nの脱窒に必要な有機物を主として汚泥中に吸着・蓄積している有機物質の溶出に依存しているものと考えられ、経過時間が長くなると有機物の溶出量も減少するため脱窒速度が遅くなると考えられる。

4. 結 論

以上、回分式活性汚泥法の窒素除去について、その運転操作と反応槽内における窒素の挙動について考察したが、以下に掲げるような結論が得られた。

Table 6 Nitrification rates in the various aerobic condition

RUN No.	Nitrification Rate (mgN/gMLSS.hr)	S-KN (mg/l)	Time (hr)
1-4	1.6	29.5	2- 6
	0.65	5.5	10-14
3-1	0.80	17	1- 4
	0.81	13	5- 8
	1.1	7.5	19-21
3-2	0.88	17	1- 1.5
	1.2	15	6- 7.5
	0.59	10	13-18
Wasted sludge from RUN 3-3	0.47	2.0	1- 4.5
Wasted sludge from RUN 3-4	0.27	2.0	1- 4.5

Table 7 Denitrification rates in the various anoxic conditions

RUN No.	Denitri. Rate (mgN/gMLSS.hr)	S-COD (mg/l)	NO_x^- -N (mg/l)	Time (hr)
1-4	above 2.6	52	7.1	0- 1
	above 0.26	15	18	6-10
	above 0.10	15	21	14-21
3-1	above 1.1	75	6.8	0- 1
	above 3.1	48	14.5	4- 5
3-2	above 1.0	73	6.3	0- 1
	above 2.0	47	6.0	5- 6
Wasted Sludge from RUN 3-3	0.55	18	5.9	0- 2
Wasted Sludge from RUN 3-4	0.36	19	4.3	0- 2

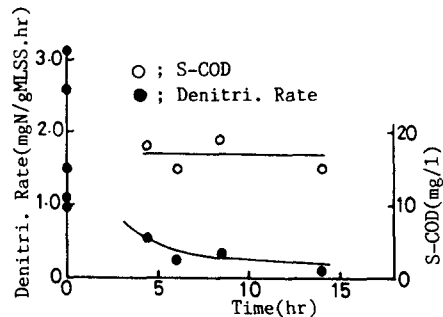


Fig. 15 Relationship between elapsed time after substrate feeding and denitrification rate.

1) 回分式活性汚泥法の多様な運転操作を基質の供給方式(1回供給式か分注供給式),供給時の槽内の嫌気・好気条件(AI_{tn}/I_{tn}),槽内の嫌気・好気時間比(At/Ot)に分けて検討することにより効率的な運転操作を決定することができる。

2) 1回供給式,分注供給式の両方式とも投入全時間中,槽内の曝気は停止して攪拌する嫌気の状態であることが望ましい。すなわち, $AI_{tn}/I_{tn}=1$ が最適条件となる。

3) 1回供給式,分注供給式とも至適な At/Ot 比があることを示しており,分注供給式では $At/Ot=0.6$,1回投入式では $At/Ot=0.5$ となった。これは,ピーク値までは嫌気的时间が増す程脱窒反応は促進するが,それ以上嫌気時間が増すと硝化反応が抑制され結果として窒素除去率も低下する。

4) 分注供給式が1回供給式に比べて総じて処理成績が安定している。これは1回供給式が反応槽内の嫌気・好気状態を主に,間欠曝気に依存しているのに対し,分注供給式は分注供給と間欠曝気の両操作から補うため,相乗効果的な作用から確実な嫌気・好気状態となり,処理成績が安定するものと考えられる。

5) 回分式活性汚泥槽中の窒素化合物の変化経路をみた結果,1サイクルの中でS-COD,S-Org.Nの吸着・蓄積とともに基質の溶出現象が認められた。これは回分式活性汚泥法などの非定常流入系の解析に重要となる。すなわち,基質の供給時にS-CODとともにS-Org.Nは吸着・蓄積しながら無機化され,好気条件下で硝化された後,嫌気条件下で脱窒される。反応の進行とともに液相の基質がなくなると汚泥相に吸着・蓄積されていた基質やライシスによる2次的基質が液相に溶出し,好気的条件下ではCOD酸化と K_jN の硝化反応が起こる。一方,嫌気条件下において脱窒反応に利用されるCOD源は液相中のCODのみでなく,汚泥相のCODの溶出を含めないと説明できない。このようにS-COD,S-Org.Nの吸着・蓄積現象は液相中に基質が少なくなった時の脱窒反応の機構を説明するための基礎となる現象である。

6) 回分式活性汚泥法における窒素除去において $(N/C)_f$ 比はその除去率に最も大きく関与する因子である。そのため,運転操作などの条件を評価する時は必ず $(N/C)_f$ 比を一定にして検討する必要がある。

5. おわりに

本研究では回分式活性汚泥法における窒素除去について,運転操作や窒素の挙動に関して若干の知見が得られた。しかし,リン除去やパルキングに対する機構解析は今後の検討課題として残している。今後は,分注供給式回分式活性汚泥法の1サイクル当たりの基質の分注回数とともに汚泥の沈降性とリンの挙動,そして基質の吸着・蓄積などについても総合的な研究が必要である。

最後に,本研究の遂行にあたって,助言,協力を頂いた,京都大学工学部松井三郎助教授,石川宗孝助手,尾崎博明助手に深く感謝致します。

「記号表」

- AI_{tn} : 1サイクル時間中の基質の実供給時間中の嫌気的な実供給時間〔hr〕
 At : 1サイクル時間中の嫌気的な攪拌時間〔hr〕
 Ct : 1サイクル時間〔hr〕
 I_{tn} : 1サイクル時間中の基質の実供給時間〔hr〕
 I_{tt} : 1サイクル時間中で基質の供給が終了するまでの時間(供給終了時間)〔hr〕
 $(N/C)_f$: 供給基質中の有機炭素性基質(COD_{cr},BOD₅等)当たりの窒素含有率〔%〕
 Ot : 1サイクル時間中の好気的な攪拌時間〔hr〕

参 考 文 献

- 1) US EPA. Summary Report Workshop On Biological Phosphorous Removal In Municipal Wastewater Treatment, (1982)
- 2) A. C. van Haandel et al.: Wat. Sci. Tech., Vol. 14, pp. 443-461, (1982)
- 3) G. A. Ekama et al.: Wat. Sci. Tech., Vol. 15, 3/4, pp. 283-318, (1983)
- 4) 遠矢泰典ほか: 用水と廃水, Vol. 15, No. 9, pp. 1058-1074, (1973)

- 5) 早川登ほか：用水と廃水, Vol. 24, No. 6, pp. 644-654, (1982)
- 6) 橋本奨：水処理技術, Vol. 26, No. 1, pp. 3-15, (1985)
- 7) 石川宗孝：曝気条件下における窒素除去に関する研究, 京都大学学位論文, (1985.5)
- 8) J. Silverstein, E. D. Schroeder: J. WPCF, Vol. 55, No. 4, pp. 377-384, (1983)
- 9) J. C. Palis, R. L. Irvine: J. WPCF, Vol. 57, No. 1, pp. 82-86. (1985)
- 10) M. L. Arora et al.: J. WPCF, Vol. 57, No. 8, pp. 867-875, (1985)
- 11) 太宰宙朗ほか：下水道協会誌, Vol. 22, No. 250, pp. 60-66, (1985)
- 12) 岡田光正ほか：水質汚濁研究, Vol. 8, No. 11, pp. 729-736, (1985)
- 13) 社団法人日本下水道協会：下水試験方法, (1984)
- 14) 藤井正博ほか：第23回下水道研究発表会講演集, pp. 305-307, (1986)
- 15) 片岡哲夫, 岡本裕三：第23回下水道研究発表会講演集, pp. 320-322, (1986)
- 16) 風袋則夫ほか：第23回下水道研究発表会講演集, pp. 332-334, (1986)
- 17) J. E. Alleman, R. L. Irvine; Waster Res., Vol. 14, pp. 1483-1488, (1980)