

(14) 嫌気性流動床による都市下水の脱窒素に関する基礎研究

金沢大学工学部 松井 三郎
金沢大学大学院 今井 章雄
金沢大学大学院 大滝 裕一

1. はじめに

近年、数多くの論文により、メタノールを水素供与体として用いた流動床方式脱窒素法の卓越した処理能力が報告されている。本研究は、この優れた流動床方式脱窒素法をさらに効率化するために、メタノールの代りに都市下水中の有機炭素源(TOC)を利用することにより、外部から添加されるメタノール量を大幅に減ずることを意図するものである。本報では、都市下水中の有機炭素源を利用する流動床方式脱窒素法における現象の定性化及び定量化を試みる。

2. 実験装置及び実験目的

実験装置の概要は図-1に示す。サンプリングタップは底部より20cm間隔で取り付けた。生物膜担体としては、平均粒径 $D_p=0.56\text{mm}$ の造粒型軽量骨材(ビルトン:住友金属:密度 $\rho=2.32\text{g/cm}^3$)を用いた。実験期間中、初高 L_0 は約100cmを基準とした。流入水としては、表-1に示した水質を持つ金沢市A下水処理場の最初沈澱池越流水を原水とし、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 源として NaNO_3 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 源として NaNO_2 を添加したものを用いた。なお、添加 $\text{NO}_3\text{-N}$ あるいは $\text{NO}_2\text{-N}$ に比して流入原水中の有機炭素源が不足した場合には、その性状が比較的都市下水と類似していると考えられるスキムミルクを適量添加した。本実験の目的は次のように大別しうる。

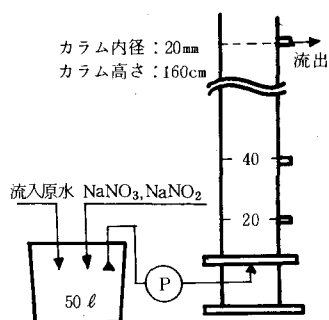


図-1 実験装置の概要

表-1 流動原水の水質

T-N (mg/ℓ)	12.8 ~ 34.1
$\text{NH}_3\text{-N}$ (mg/ℓ)	8.5 ~ 22.7
$\text{O}_\text{r}\text{-N}$ (mg/ℓ)	3.2 ~ 13.7
TOC (mg/ℓ)	13.5 ~ 70.0
COD(fil)(mg/ℓ)	71 ~ 220
$\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/ℓ)	0.1 ~ 0.4
$\text{NO}_2\text{-N}$ (mg/ℓ)	

〔定常状態時実験〕定常状態において流動床カラム内に生起する脱窒素現象を把握し、評価検討を加えるものである。なお、定常状態達成のための予備運転期間は5時間とした。実験条件は表-2に示す。〔非定常状態時実験〕図-2に示されているように、流入 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度を一定に保ち、一方、都市下水中の有機炭素源(TOC)を定常状態時の一定濃度から急激に0付近に落とす条件(feed stop)、及び急激に高くする条件(feed up)を定常系に与えることにより

反応系の応答を捉え、脱窒素反応機構を究明するものである。実験条件は表-2に示す。〔パルス応答実験〕トレーサとしてNaClを用いてパルス応答実験を行ない、微生物付着状態における流動床の混合特性を求めるものである。実験条件は表-2に示す。

3. 実験結果及び考案

〔定常状態時実験〕図-3は、 $\text{NO}_3\text{-N}$ を添加し、有機炭素源非律速の場合の典型的脱窒素現象を表わすものである。約10mg/lの $\text{NO}_3\text{-N}$ が層高60cm(水理学的滞留時間:HRT=2.4分)で約90%除去されている。これより、本処理法の卓越した反応速度の大きさが確認される。0次反応を仮定して

求めた脱窒素反応速度は平均 $9.1\text{mg NO}_3\text{-N/gvsshr}$ となった。この反応速度は、都市下水中の有機炭素源を用いた脱窒素

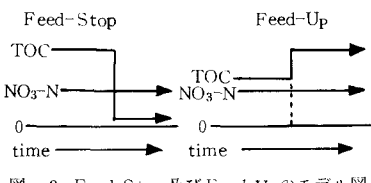


図-2 Feed-Stop及びFeed-Upのモデル図

表-2 実験条件

	定 常	非 定 常
水理学的滞留時間 (HRT) [min]	3.7 ~ 6.2	3.5 ~ 5.8
流量Q [ml/min]	70 ~ 104	66 ~ 107
膨張率 L_t/L_0 [-]	1.16 ~ 1.26	1.10 ~ 1.38
温度T [°C]	10 ~ 40	10 ~ 40
流入 $\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/ℓ)	1.2 ~ 15.4	f.s.前 7.2 ~ 22.1 f.s.後 7.7 ~ 26.7 f.u.前 8.7 ~ 10.7 f.u.後 7.4 ~ 10.2
流入 $\text{NO}_2\text{-N}$ (mg/ℓ)	0.06 ~ 15.9	negligible
流入TOC (mg/ℓ)	13.5 ~ 169.0	f.s.前 27.5 ~ 156.0 f.s.後 1.5 ~ 9.5 f.u.前 10.5 ~ 38.5 f.u.後 9.7 ~ 144.0
VSS (mg/ℓ)	9,800 ~ 13,000	9,800 ~ 13,000
DO (mg/ℓ)	negligible	negligible
NaCl濃度	5,000 (mg/ℓ)	
トレーサ流入時間	2 [min]	
温度T	20 ~ 25 [°C]	
流量Q	75 ~ 171 [ml/min]	

活性汚泥法の最大反応速度の約3倍に相当し、メタノールを用いた同方式の最大反応速度に匹敵するものである¹⁾。さらに、表-2にあるように、本実験下のVSSは約10,000mg/gであるため、単位時間当りの反応速度は脱窒素活性汚泥法のそれを大きく上回ることになる。この結果は、担体上

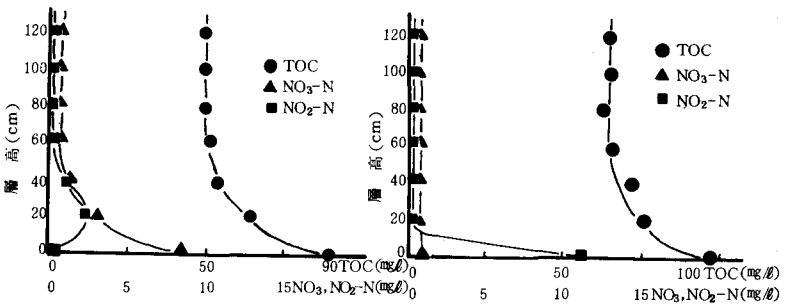


図-3 定常状態、有機炭素源非律速、NO₃-N添加 図-4 定常状態、有機炭素源非律速、NO₂-N添加

の微生物膜が薄く維持され微生物の活性度が高いことと、微生物中の脱窒素菌の密集度が高いことに依るものと推測される。図-4は、NO₂-Nを添加し、有機炭素源非律速条件におけるNO₂-Nの除去挙動を示す典型例である。NO₂-NのN₂への転化速度を計算すると平均18.0mg NO₂-N/gvssh・hとなり、NO₃-Nの除去速度を大きく凌いでいる。この結果から考察すれば、NO₃-NとNO₂-Nが共存する場合に、NO₂-Nの蓄積現象は起こり得ない。しかしながら、図-3において、明白に、NO₂-Nが蓄積している。よって、以上の事柄より、NO₃-NとNO₂-Nとの間に有機炭素源を巡る酵素競合関係の存在が示唆し得る。なお、Eggers²⁾は、流動床方式脱窒素法において、NO₃-NのNO₂-Nに対する拮抗的酵素阻害の存在を報告している。図-5は、TOC/(NO₃-N+NO₂-N)比と(N-NO₃-N+NO₂-N)除去率の関係をプロットしたものである。TOC/(NO₃-N+NO₂-N)

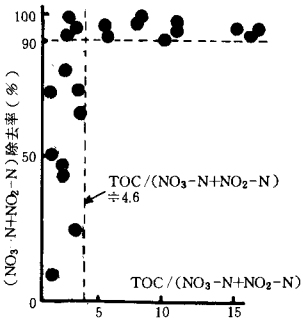


図-5 TOC/(NO₃-N)+(NO₂-N)比と除去率

比が4.6より小さくなると、反応系は(N-NO₃-N+NO₂-N)除去率90%を維持できなくなる。従って、この4.6という値が、将来、本処理法における運転管理上の1つの指標と成りうるものと考えられる。次に脱窒素反応速度に対する温度の影響について考察する。有機炭素源非律速の場合、一般に反応速度は0次反応式に従う。図-6は、反応が良好なデータを用い、0次反応式より求めた速度定数K_Nと温度Tの関係をプロットしたものである。得られた直線はArrheniusの式に従うものと考え、図より次式が導かれる。

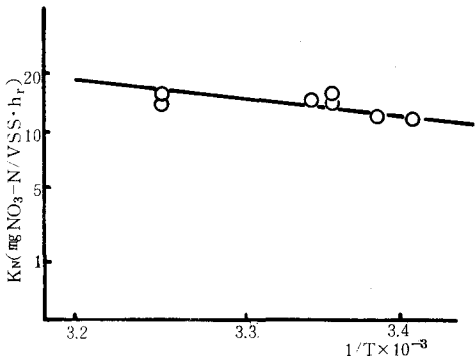


図-6 反応速度への温度の影響

$$K_N = 1.73 \times 10^4 e^{-4300/RT} \quad R: \text{ガス定数}$$

これより、本脱窒素法における活性化エネルギーとして、4,300cal/moleという値が得られる。脱窒素活性汚泥法における活性化エネルギーは19,800cal/mole程度である³⁾。従って、本脱窒素法は脱窒素活性汚泥法に比して反応速度の温度依存性はかなり小さいものと結論される。〔非定常状態時実験〕表-3にシンボルについて記した。図-7は、十分な有機炭素源供給により良好な脱窒素反応を行なっている定常系にfeed stopをかけた場合の典型的応答結果である。トレーサー実験により、feed stop後10分程でTOCはほとんど消失することが確認されているにもかかわらず、図より明らかにfeed stop後10分以降、すなわち、液相中有

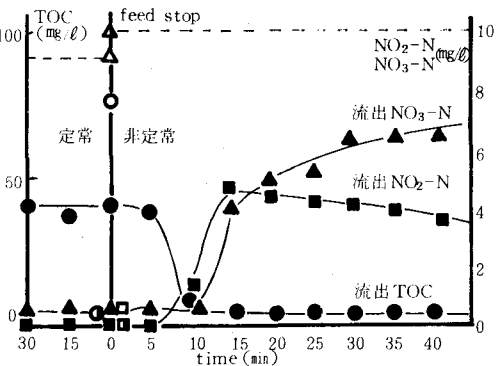


図-7 有機炭素源供給が十分な定常状態系に feed stop をかけた場合の応答

機炭素源が存在しない状態においても、反応は維持されている。この現象を既存の分子拡散理論により説明しえないことは自明であり、また、内生呼吸により水素供与体を得て脱窒素反応を行なうというWuhrmannプロセスによっても解釈しえない。すなわち、本実験条件下において内生呼吸により除去しえる最大 $\text{NO}_3\text{-N}$ 量は 0.33 mg/l 程度¹⁾にすぎず、図に示されている $\text{NO}_3\text{-N}$ 除去量に比して無視しうると考えられる。従って、このように大きな脱窒素速度は外部供給の有機炭素源に依るものと考えるのが妥当であるが、同時にこのことは液相中に有機炭素源が無いことに矛盾する。この矛盾する結果を理論的に説明するためには新しい概念の導入が必要である。本現象に対しては、Engelbrecht⁴⁾が接触安定化法において提唱し、かつ検証している「貯蔵現象」を既存の知識に組み入れることによってのみ、その挙動を把握しうる。よって、本脱窒素法においても、微生物は定常状態時に有機炭素源をその細胞内に貯蔵し、feed stop後にその貯蔵物を速やかに利用して反応を維持していると結論される。結果として、本非定常状態時実験は、定常状態においてはその存在を認識しえなかった脱窒素菌の有機基質貯蔵現象を確認位置づけたものと言える。図-8は、有機炭素源供給が不十分で反応律速を受けている定常系にfeed stopをかけた場合の典型例である。この場合、feed stop後の $\text{NO}_3\text{-N}$ 増大勾配は急なものとなり、脱窒素反応が短時間で終了している。よって、定常状態時に有機炭素源律速を受ける場合、微生物の有機炭素源貯蔵量は非常に小さいものと考えられる。図-9は、有機炭素源供給が十分な定常系に定常時の約4倍の有機炭素源feed up(shockload)をかけた場合のものである。図より、定常状態時に有機炭素源非律速の場合、反応系は有機炭素源負荷変動の影響を全く受けないことが確認される。図-10は、有機炭素源供給が不十分で反応律速を受けている定常系にfeed upをかけた場合の典型例である。feed up後10分程において、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 及び $\text{NO}_2\text{-N}$ の一時的減少が観察される。トレーサー実験により、feed up後約10分程で設定されたfeed up濃度に達することが確認されているため、この現象は有機炭素源が負荷される瞬間におけるものと言える。この一時的減少後、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 及び $\text{NO}_2\text{-N}$ は再び増大する。生命体維持及び合成のための脱窒素反応として反応が生起しているならば、このような増大は起こりえない。よって、この負荷直後の脱窒素反応は物理吸着と関連した微生物の基質輸送過程におけるものと考えられる。脱窒素反応自体が微生物のエネルギー獲得反応であり、かつ、基質輸送過程においてエネルギーを要求するものは能動輸送であるということを考慮すれば、結果として次の事柄が示唆される。脱窒素菌は、物理吸着及び能動輸送により、基質を積極的に細胞内に取り込んでいる。以後、この現象と前述した貯蔵現象を連続した現象とみなして「生物学的吸着貯蔵」と称する。〔パルス応答実験〕本実験は閉鎖反応器を仮

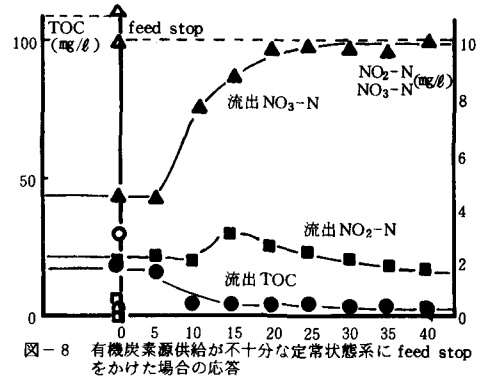


図-8 有機炭素源供給が不十分な定常状態系に feed stop をかけた場合の応答

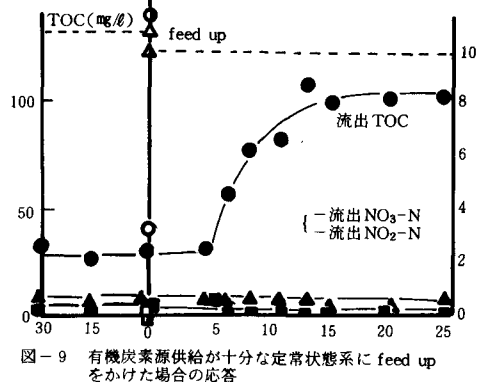


図-9 有機炭素源供給が十分な定常状態系に feed up をかけた場合の応答

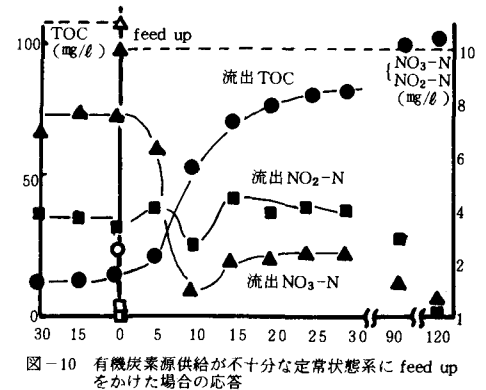


図-10 有機炭素源供給が不十分な定常状態系に feed up をかけた場合の応答

表-3 シンボルの説明

○	Feed Stop 及び Up 前流入 TOC 濃度
●	Feed Stop 及び Up 後流入 TOC 濃度
△	Feed Stop 及び Up 前流入 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度
▲	Feed Stop 及び Up 後流入 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度
□	Feed Stop 及び Up 前流入 $\text{NO}_2\text{-N}$ 濃度
■	Feed Stop 及び Up 後流入 $\text{NO}_2\text{-N}$ 濃度
●	流出 TOC
▲	流出 $\text{NO}_3\text{-N}$
■	流出 $\text{NO}_2\text{-N}$

定して行なった。図-11は E_θ 分布(局部滞留時間分布)の典型例を示す。図より、明らかに、流動床内は混合拡散を伴う押し出し流れ状態であることが確認される。図-12は、層膨張率 L_t/L_0 と混合拡散係数 D の関係を表わしたものである。 $L_t/L_0=1.35 \sim 1.50$ において、 D のピーク値が存在するものと考えられる。これは、 L_t/L_0 の増大に伴って、流動床が良好な流動層状態から輸送状態に近付いたためと考察される。 L_t/L_0 を空隙率 ϵ に換算すれば、 D のピークは $\epsilon=71.3\% \sim 75.7\%$ の間に存在することになる。触媒流動床(液体)の場合、一般に、空隙率 $\epsilon=70\%$ 付近の流動層が最も流体混合が良いと報告されている。⁵⁾よって、空隙率 ϵ と混合拡散係数 D の関係において、触媒流動床と微生物付着流動床は同一性を持つものと言える。これは、 D のピークが表われる程の高い空隙率では、生物膜担体間の相対的距離が拡大し、微生物増殖による影響が物理的現象に追従するためと考えられる。

4. 反応動力学モデル及び解析

本モデルは、反応系を固相(微生物相)と液相とに分離し、 $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{NO}_2\text{-N}$ の酵素競合関係及び脱窒素菌の有機炭素源貯蔵現象を考慮することにより、非定常状態における脱窒素反応を予測するものである。(図-13参照)モデル構築にあたって次の諸仮定を導入する。(1) Z 軸方向のみの解析を考慮する。(2)液相は Z 方向の混合拡散を伴う押し出し流れとみなす。(3)固相(微生物相)における混合拡散項及び対流項は無視する。(4)液相から固相(微生物相)への基質移動は生物学的吸着貯蔵によってのみ行なわれるものとする。(5) $\text{NO}_3\text{-N}$ 及び $\text{NO}_2\text{-N}$ は細胞膜透過が容易であると考えられるため、生物学的吸着貯蔵を受ける対象は有機炭素源のみとする。(6)生物学的吸着貯蔵段階での脱窒素反応は無視しうるものとみなす。(7)固相(微生物相)に存在するVSSは、活性微生物 X_a 、微生物として貯蔵される基質 X_s 、補足的貯蔵物質 X_{sc} 、不活性物質 X_i から成るものとする。以上の事柄を考慮し、図-14にあるような Z 軸方向の任意の高さ Z において微分物質収支をとると次のようになる。

(固相モデル)

微生物として貯蔵される基質、 X_s [mg VSS/l] :

$$\frac{\partial X_s}{\partial t} = K S X_a \left(f_r - \frac{X_s}{X_a} \right) \frac{1}{P} - \frac{K_m X_s P}{K_s + X_s P} X_a \frac{1}{P} \quad (1)$$

(生物学的吸着貯蔵項)

K : 生物学的吸着貯蔵係数 [l/mg VSShr], S : 有機炭素源 [mg COD/l], f_r : 最大貯蔵容量 [-], k_m : 脱窒素最大速度 [1/h], K_s : 半飽和定数 [mg COD/l], D : 転換係数 [-], 活性微生物, X_a [mg VSS/l] :

$$\frac{\partial X_a}{\partial X} = Y \frac{K_m X_s P}{K_s + X_s P} X_a - b X_a \quad (2)$$

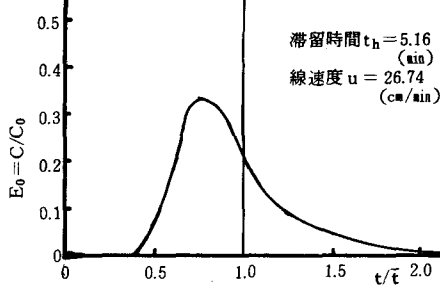


図-11 初高82cmにおける E_θ 分布

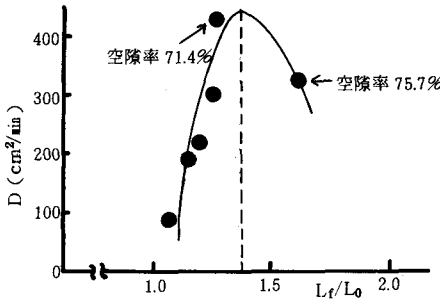


図-12 混合拡散係数と層膨張率の関係

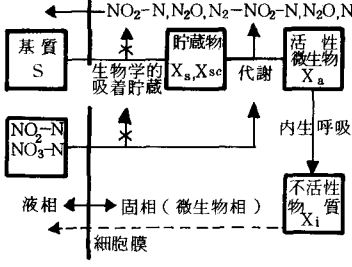


図-13 本モデルの概念図

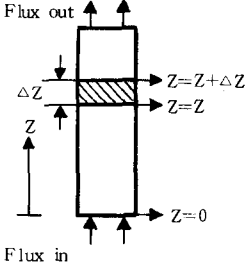


図-14 モデル図

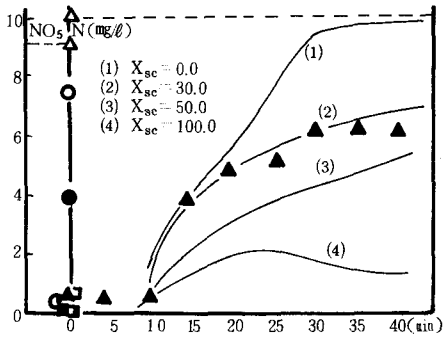


図-15 有機炭素源供給が十分な定常状態系に feed stop をかけた場合の理論値と実験値の比較

Y: 収率係数〔-〕, b: 内生呼吸速度〔1/h_r〕

不活性微生物, X_i〔mgVSS/ℓ〕:

$$\frac{\partial X_i}{\partial t} = fbX_a \quad (3)$$

f: X_aのうち生物分解不可能な部分〔-〕

補足的貯蔵物質, X_{sc}〔mgVSS/ℓ〕: この貯蔵物質の存在は, 貯蔵物としてX_aのみを用いた解析結果より導かれた。図-15の線分(1)は, X_aのみを用いて有機炭素源非律速の定常系に feed stop をかけた場合のNO₃-N解析結果である。NO₂-N理論値は feed stop 後20分までは実測値と良く一致するが, その後, X_aの枯渇により急速に逸脱する。この挙動はX_aの量的変化によって矯正し得ず, 却って一致していた部分が逸脱してしまう。従って, feed stop後20分までは正しく予測されているとみなし, その後の脱窒素反応は, X_aは枯渇しているゆえに, X_aとは質的に異なる貯蔵物に依るものと推測した。実測値の挙動より, X_{sc}の分解速度を非常に小さいものとみなして内生呼吸速度に近似し, シュミレーションによってX_{sc}の最適初期値を求めた(図-15参照)。

$$\frac{\partial X_{sc}}{\partial t} = -bX_a \quad (4)$$

(液相モデル)

有機炭素源(基質), S〔mgCOD/ℓ〕:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = DZ \frac{\partial^2 S}{\partial Z^2} - U_Z \frac{\partial S}{\partial Z} - KSX_a \left(f_r - \frac{X_a}{X_s} \right) \quad (5)$$

(混合拡散項)(対流項)(生物学的吸着貯蔵項)

D_Z: Z軸方向混合拡散係数〔cm²/h_r〕, U_Z: Z軸方向線速度〔cm/h_r〕

硝酸性窒素, N₃〔mgNO₃-N/ℓ〕:

$$\frac{\partial N_3}{\partial t} = DZ \frac{\partial^2 N_3}{\partial Z^2} - U_Z \frac{\partial N_3}{\partial Z} - \frac{KN_3(X_s + X_{sc})P}{K_s + (X_s + X_{sc})P} X_a \quad (6)$$

(脱窒素項)

K_{N3}: NO₃-Nの最大消失速度〔1/h_r〕

亜硝酸性窒素, N₂〔mgNO₂-N/ℓ〕: シュミレーションより, 酵素競合項として拮抗的酵素阻害を採用した。

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = DZ \frac{\partial^2 N_2}{\partial Z^2} - U_Z \frac{\partial N_2}{\partial Z} - \frac{KN_2(X_s + X_{sc})P}{K_s + (X_s + X_{sc})P} X_a \left(1 + \frac{N_3}{K_i N_2} \right) + Y_N \frac{KN_3(X_s + X_{sc})P}{K_s + (X_s + X_{sc})P} X_a \quad (7)$$

(酵素阻害項)(NO₃-NのNO₂-Nへの転化)

K_{N2}: NO₂-NのN₂への最大転化速度〔1/h_r〕, Y_N: 消失NO₃-NのNO₂-Nへ転化する割合〔-〕, K_i: 拮抗的酵素阻害係数〔-〕

次に, 以上のようなモデル式を用い, 定常状態時実験結果を初期値として有限差分法により求めた非定常状態解析結果について述べる。使用した定数値については表-3に示す。なお, 最大貯蔵容量f_rについては, 細胞分裂周期原則に鑑み, 活性微生物がその細胞内へ貯蔵し得る物質量は活性微生物自身の量がその上限であると推定し, 1.0を採用した。図-16は, 有機炭素源供給が十分で反応律速を受けていない定常系に feed stop をかけた場合のものである。NO₃-N及びTOC理論値は実測値と良く一致している。NO₂-Nの場合, その

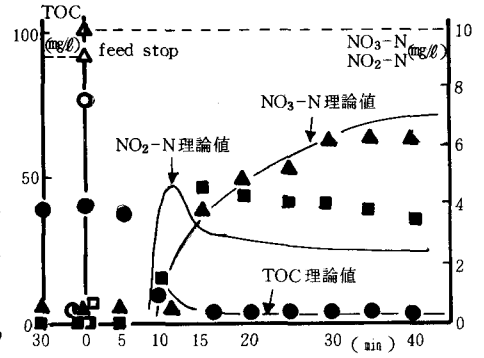


図-16 有機炭素源供給が十分な定常状態系に feed stop をかけた場合の理論値と実験値の比較

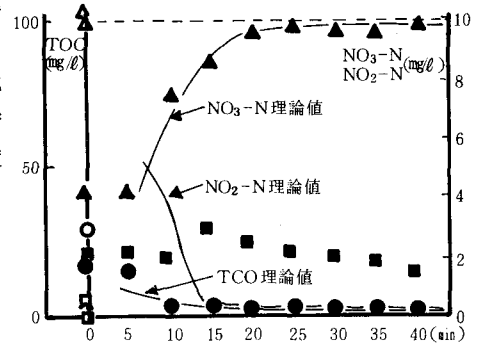


図-17 有機炭素源供給が不十分な定常状態系に feed stop をかけた場合の理論値と実験値の比較

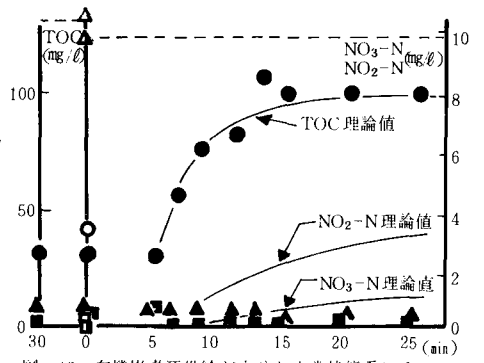


図-18 有機炭素源供給が十分な定常状態系に feed up をかけた場合における理論値と実験値の比較

挙動傾向は一致しているものの、ピーク出現時刻及び値自体の相違がみられる。図-17は、有機炭素源供給が不十分で反応律速を受けている定常系に feed stop をかけた場合の結果である。この場合も、図-16と同様に、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 及び TOC は良好に予測されているが、 $\text{NO}_2\text{-N}$ については実測値が理論値を上回っている。 $\text{NO}_2\text{-N}$ の挙動に関して、図-16と図-17に共通に認められることは、feed stop 後約12分程度で実測値が理論値を上回り、その後の理論値と実測値の相違も同程度であるということである。理論値を信頼するならば、微生物相に $\text{NO}_2\text{-N}$ が一定量停滞していることになるが、この相違の原因は不明である。次に feed up の解析結果について述べる。有機炭素源供給が十分で反応律速を受けていない定常系に feed up をかけた場合の解析において、全ての理論値は実測値とかけ離れたものとなった。そこで、feed stop の場合

表-4 各 定 数 値

NO	SYMBOL	VALUE	DIMENSION	
1	D	0.0 ~ 500.0	cm^2/min	実験値
2	K	0.01(0.001)	$\text{m}^3/\text{g VSS} \cdot \text{hr}$	simulation
3	K_m	0.3	1/hr	実験値
4	K_s	90.0	$\text{g CODcr}/\text{m}^3$	実験値
5	Y	0.2	—	文献値2)
6	f _r	1.0	—	推定値
7	b	0.001	1/hr	文献値6)
8	f	0.25	—	文献値7)
9	P	1.42	—	文献値7)
10	K_{N_3}	0.019	$\text{g NO}_3\text{-N}/\text{g VSS} \cdot \text{hr}$	実験値
11	K_{N_2}	0.346	$\text{g NO}_3\text{-N}/\text{g VSS} \cdot \text{hr}$	実験値
12	Y_N	0.8	—	文献値2)
13	K_i	1.2	—	文献値2)

よりも feed up に多大な影響を及ぼすと考えられる生物学的吸着貯蔵係数 K を 1/10 として計算すると、図-18 のような結果となった。図において、 $\text{NO}_2\text{-N}$ を除き、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 及び TOC の理論値と実測値は良く一致している。この結果より、次のような推論が成される。すなわち、微生物は、苛酷な環境条件においては、生命体維持のために環境に適した最良の生理活動をとると考えられるため、本実験における feed stop 及び feed up のような正反対の性質を持つ生存条件では、微生物の生理活動もかなり異なった形態をとるということである。以上の結果より、本動力学モデルは、有機炭素源貯蔵現象及び酵素競合関係を式中に組み入れることにより、非定常状態での脱窒素反応について、 $\text{NO}_2\text{-N}$ について良好とは言えないが、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 及び TOC の挙動については十分良好に予測し得たと結論される。

5. 結び

本研究により次のような結果が得られた。(1)流動床方式脱窒素法は卓越した反応速度を有する。(2) $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{NO}_2\text{-N}$ との間に酵素競合関係が存在する。(3)脱窒素率90%以上を得るためには、都市下水においては TOC/ ($\text{NO}_3\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N}$) 比を4.6以上に保つ必要がある。(4)本脱窒素法は脱窒素活性汚泥法に比較して反応速度の温度依存性がかなり小さい。(5)脱窒素反応においても有機炭素源貯蔵現象が生起する。(6)本脱窒素法は有機炭素源 shock load に対して強い抵抗性を示す。(7)生命体維持、合成のための脱窒素反応以外の脱窒素反応が基質輸送過程において生ずる。(8)流動床内は混合拡散を伴う押し出し流れ状態である。(9)混合拡散係数の最大値は空隙率 71.3% ~ 75.7% の間に存在する。(10)本モデルは、 $\text{NO}_2\text{-N}$ については不十分なものであったが、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 及び TOC の非定常状態における挙動については十分良好に予測し得た。

今後、本論文上に提起した考察をより詳細に検討し、本モデル式が定常→非定常→定常のような連続系で適用しうるようにするつもりである。

最後に、本研究に対する喜多慎一氏（フジクリーン工業株式会社）の御協力に感謝致します。また、本研究の遂行に当って、一部、文部省科学研究費、総合研究(A) 435028 の補助を得た。

（参考文献）

- 1) “Water Pollution Microbiology” Vol. 2 Ralph Mitchell (1978)
- 2) “Biological Denitrification in a fluidized bed with sand as a carrier material” E. Eggers & T. Terlow, Water Research. Vol. 13 (1979)
- 3) “水処理工学” 井出哲夫、技報堂出版
- 4) “Microbial substance storage in activated sludge” C. F. Walter, R. S. Engelbrecht & R. E. Speece, Journal of the Sanitary Engineering Division (1968)
- 5) “流動層” 白井隆 科学技術社 6) “廃水処理プロセス” W. W. Eckenfelder 松井三郎監訳、技報堂出版
- 7) “The Activated Sludge Process Part II - Dynamic Behaviour” Ekama et al., Water S. A. (1977)